SYRTHES 3.4 - Manuel utilisateur

I.Rupp, C. Péniguel

EDF R&D
6 Quai Watier
78401 CHATOU - FRANCE

support-syrthes@edf.fr

2008



Avant-propos

Ce document constitue le manuel utilisateur du code de thermique solide et de rayonnement SYRTHES 3.4. Il comprend également un guide de l'utilisation de ce logiciel ainsi que les références pour son utilisation couplée avec le code de thermohydraulique *Code_Saturne*.

Table des matières

Introduction 1

Dans de très nombreux processus industriels [1], les phénomènes thermiques couplent étroitement fluide et solide, c'est par exemple le cas des chocs thermiques, lorsque certains composants subissent des variations de température qui peuvent être brusques et de grande amplitude. Les dilatations différentielles qui en résultent peuvent être à l'origine de contraintes mécaniques qui provoquent l'apparition de fissures. De façon à garantir l'intégrité des matériels, il est crucial de pouvoir prédire les intéractions thermiques entre fluide et solide. De même l'optimisation des échangeurs semble passer par le développement et l'utilisation d'outils capables d'appréhender les phénomènes thermiques à la fois dans les milieux fluides et solides.

Par ailleurs, dans certaines configurations industrielles (en air et plus généralement en présence de gaz), le transfert d'énergie sous forme de rayonnement ne peut être occulté. En fait, négliger cet aspect, et ce même pour des températures relativement basses, peut conduire à des comportements sinon non physiques du moins fort éloignés de la réalité.

Longtemps l'étude de ces phénomènes et l'optimisation des procédés ont reposé sur l'expérience et les campagnes d'essais paramétriques. Indépendamment de son coût parfois élevé, l'approche expérimentale ne conduit qu'à un nombre limité d'endroits où des valeurs quantitatives sont accessibles (en fait, là où sont placés les capteurs).

Avec l'avènement de calculateurs de plus en plus puissants, il apparaît intéressant de proposer des outils numériques permettant la simulation des phénomènes qui intéressent les concepteurs lors du dimensionnement d'un organe intervenant dans un processus industriel. En effet, on dispose alors d'un outil souple, bien adapté à la compréhension des phénomènes et aux études paramétriques, sous réserve bien entendu, que l'outil numérique soit bien validé par des banques de données expérimentales ou bien par des formules analytiques lorsqu'elles existent.

Au Département Mécanique des Fluides et Transferts Thermique de EDF-R&D, depuis de nombreuses années, des équipes travaillent sur l'élaboration de codes sophistiqués de mécaniques des fluides. Aujourd'hui, *Code_Saturne* permet l'appréhension de nombreux phénomènes thermohydrauliques. Il a été validé à l'aide de multiples cas tests, et est largement utilisé. Ce code ne s'attache qu'à la résolution des phénomènes fluides.

La nécessité de prendre en compte simultanément les phénomènes thermiques dans le fluide et le solide a conduit à proposer un outil informatique indépendant nommé SYRTHES.

L'organisation informatique retenue consiste en un code indépendant SYRTHES (Système de Résolution THErmique Solide), qui peut être utilisé en tant que code de conduction/rayonnement ou qui peut être activé en couplage avec le code de thermohydraulique *Code_Saturne* pour lesquel il se présente alors comme un module à part entière. Le document [2] décrit l'utilisation du code *Code_Saturne*.
L'objectif de ce document est de présenter l'utilisation de SYRTHES 3.4 et de son couplage éventuel au code *Code_Saturne*.

Quelques informations concernant ce document 2

Ce document est destiné à contribuer à rendre sinon plus simple, disons plus agréable l'utilisation du code de thermique solide et de rayonnement SYRTHES 3.4 et de son couplage avec le code de thermohydraulique *Code_Saturne*. Pour l'utilisation du code *Code_Saturne* proprement dite, on se référera à sa notice d'utilisation [2].

2.1 Pourquoi ce manuel ?

L'objectif du produit est de pouvoir appréhender des processus industriels complexes. Il paraît évident que la prise en compte des systèmes globaux lors de la simulation, si elle laisse espérer une meilleure simulation du phénomène, s'accompagne d'une plus grande complexité de mise en oeuvre. En particulier le nombre de paramètres et d'outils informatiques à maîtriser augmente.

On conçoit par exemple que les propriétés volumiques du solide ainsi que les diverses conditions aux limites qu'il convient d'appliquer à la frontière du domaine solide doivent être précisées. Dans le cadre des simulation couplant fluide et solide, le comportement du solide peut être fondamentalement différent de celui du fluide, l'utilisateur ne doit plus penser uniquement en terme d'un système isolé, mais considérer le phénomène dans un cadre plus global, faisant intervenir deux mécanismes ou plus. On aimerait toutefois rassurer l'utilisateur en ajoutant que les calculs au sein du solide, de par la nature souvent linéaire du phénomène de diffusion, sont souvent plus simples à interpréter que les phénomènes fondamentalement non linéaires qui interviennent dans le fluide.

2.2 A qui est destiné ce manuel ?

Le manuel est centré sur l'utilisateur occasionnel maîtrisant bien les pré- et post- processeurs qu'il compte utiliser et ayant suivi une formation, même réduite, sur le code thermique solide SYRTHES 3.4. Dans le cas de l'utilisation du couplage avec un code de thermohydraulique, on suppose que l'utilisateur maîtrise également bien *Code_Saturne*.

Pour les débutants à l'utilisation de SYRTHES, il semble en premier lieu plus optimal de suivre une formation (même courte) sur la façon dont il faut aborder le problème thermique solide. Pour attaquer les problèmes couplés avec un calcul fluide, on comprendra qu'une

condition sine-qua-non à une utilisation optimale du produit SYRTHES-*Code_Saturne* passe par une maîtrise du code thermohydraulique sans couplage avec le solide. On pourra, pour cette étape, consulter la notice d'utilisation du code *Code_Saturne* ([2]). Il peut être également intéressant de se procurer le manuel théorique du code ([3]).

2.3 Organisation du manuel

Ce paragraphe précise l'organisation de ce manuel. Il a été fractionné en divers chapitres ayant des objectifs différents. Le sommaire détaillé (en tête du manuel), l'index, ainsi que la structuration du document devrait faciliter la recherche et l'accession à l'information souhaitée. Les tableaux récapitulatifs placés en annexe de ce document, peuvent également contribuer, soit à répondre directement aux questions que se pose l'utilisateur, soit à l'aiguiller vers une explication plus détaillée.

Le manuel a été fractionné en deux grandes parties :

- **Fonctionnalités et utilisation de** SYRTHES

  Le chapitre 3 est très général. Il est destiné à souligner l'existence de fonctionnalités et évoquer les quelques principes généraux suivis par les concepteurs du code. Sa lecture est conseillée à toute personne débutant sur le produit, ou aux utilisateurs se posant des questions sur l'adéquation entre les possibilités offertes par cette version et le problème auquel ils sont confrontés. Par ailleurs, la seconde partie du chapitre s'avère importante puisqu'elle précise certaines conventions et méthodologies qui sont utilisées dans SYRTHES.

  Le chapitre 4 rappelle l'architecture du produit, ce qui peut aider l'utilisateur lors de la phase d'organisation de son cas. En particulier, ce chapitre rappelle les différents fichiers et outils qui interviennent à la fois en amont et en aval d'un calcul. Il décrit en particulier les utilitaires informatiques destinés à produire les fichiers aux différents formats de post-processeurs. L'emploi de chacun de ces utilitaires est décrit en détail.

  Le chapitre 5 concerne les fichiers de données utilisés lors de la réalisation d'un calcul. L'entrée des paramètres du calcul étant une étape majeure dans la réalisation d'une étude, on lui consacre entièrement le chapitre 6. Tous les paramètres et leur action sur le calcul sont explicités en détail.

  Le chapitre 7 concerne les sous-programmes utilisateur. Il est à noter que dans un certain nombre de cas, le recours à ces sous-programmes est superflu, l'utilisation des mots-clés étant suffisante. Chacun de ces sous-programmes est décrit en détail.

- **Méthode et mise en œuvre par l'exemple**

  Le chapitre 8 évoque une méthodologie possible pour la réalisation d'un calcul. Les utilisateurs pourront donc s'inspirer des éléments rassemblés dans le chapitre pour les aider à trouver la méthode de travail qui leur semble la plus appropriée.
  On trouvera également abordés les problèmes de gestion des erreurs et une démarche pour l'analyse d'un éventuel dysfonctionnement du calcul est proposée.

Le chapitre 9 présente une compilation d'exemples commentés (parfois avec beaucoup de détails). Le choix volontaire qui a été fait est de redécrire finement la démarche conduisant à la simulation d'un cas, depuis l'analyse du phénomène à modéliser, le choix des paramètres, jusqu'à la phase de post-processing et d'analyse. Cela entraîne bien sûr une certaine répétition d'aspects évoqués à d'autres endroits du document. En contrepartie cela permet de mettre l'accent sur les aspects physiques qui ont été volontairement occultés lors de la description des paramètres et mots-clés. Les utilisateurs pourront mettre à profit ces exemples lors de la mise en œuvre de leurs propres cas.

Enfin, on trouvera en annexe la description des formats fichiers résultats (notamment destiné aux utilisateurs désirant analyser leurs résultats avec des post-processeurs autres que EnSight ou Rubens) ou encore des tableaux récapitulatifs ayant pour objectifs de synthétiser les données et de permettre à l'utilisateur un accès plus rapide à l'information.

2.4 Niveau de complétude

On trouvera dans ce manuel, une description la plus exhaustive possible des aspects auxquels un utilisateur peut se trouver confronté lors de la mise en œuvre de Syrthes. En particulier l'organisation du produit, une description des divers paramètres accessibles aux utilisateurs et leurs actions sont explicitées. De même sont repris et expliqués l'ensemble des sous-programmes utilisateurs disponibles, dans les cas (minoritaires) où la complexité du problème ne permet plus de le définir simplement par le biais des mots-clés.

Il faut être conscient que l'objectif de ce manuel n'est pas de décrire les méthodes numériques mises en œuvre, ni de donner tous les éléments éventuellement nécessaires à l'extension des fonctionnalités présentes dans la version Syrthes 3.4.

Pour une efficacité maximale, on supposera que l'utilisateur qui réalise des calculs couplés Syrthes/code fluide dispose des manuels relatifs à l'utilisation du code *Code_Saturne* [2], [3].

Les personnes intéressées par un aperçu des méthodes mises en oeuvre au sein de Syrthes pourront consulter entre autres le document [4]. Cette référence décrit certains aspects théoriques et numériques utilisés dans la version 1.0. L'établissement des équations fondamentales et les méthodes numériques de base restent d'actualité dans la version actuelle du code.

On pourra trouver dans les exemples du chapitre 9 et la partie validation de la référence [4] diverses configurations illustrant le domaine d'application du code.

2.5 Mise à jour

L'obtention d'un produit optimal nécessite la collaboration des utilisateurs. Pour cette raison, ce manuel comporte une fiche (en fin de document) permettant de rassembler les

anomalies et les améliorations souhaitées ou difficultés rencontrées lors de la mise en oeuvre de SYRTHES 3.4.

Première partie

SYRTHES 3.4

Fonctionnalités et spécificités 3

Ce chapitre est destiné à donner une idée précise des potentialités du code SYRTHES et de son couplage avec le code de thermohydraulique *Code_Saturne*[1].

On commence par rappeler les phénomènes physiques qui sont pris en compte puis on explicite les choix de modélisation qui ont été pris. Enfin, on trouvera dans ce chapitre les principales conventions qui sont utilisées dans SYRTHES.

Les utilisateurs pourront donc de reporter à ce chapitre pour

- vérifier si le problème qu'ils souhaitent traiter entre dans le champ d'application de la version,
- comprendre certains mécanismes intervenant au niveau de la modélisation,
- prendre connaissance des conventions qui ont été choisies,
- disposer d'informations sur les principes de mise en œuvre et le fonctionnement de l'interface utilisateur.

On rappelle enfin que ce chapitre n'a pas pour but d'expliquer la mise en œuvre d'une fonctionnalité et encore moins la théorie sous-jacente, mais de mettre en valeur son existence. Les éléments et opérations relatives à la mise en œuvre seront évoqués dans les chapitres suivants de ce document.

3.1 La conduction thermique

Les différentes possibilités de SYRTHES sont décrites de façon succincte, en appuyant sur les avantages et limitations de chacune. Les lecteurs sont mis en garde contre une apparente complexité qui pourrait se dégager d'une première lecture. En effet, il faut souligner que la majorité des utilisateurs ne seront concernés que par un aspect, ou tout du moins une partie réduite des potentialités offertes.
Les différentes potentialités ont été classées dans un ordre croissant de difficulté et de probabilité d'occurence.

3.1.1 Le phénomène simulé

Lorsque différentes parties d'un corps sont à des températures différentes, la chaleur se propage des régions "chaudes" vers les régions "froides". Ce transfert se fait essentiellement par trois moyens différents :

[1] Son objectif n'est cependant pas de rappeler les champs d'application du code de thermohydraulique, qui possède sa documentation propre.

- par conduction (la chaleur passe par le solide lui-même),
- par convection (la chaleur est alors transférée par déplacement d'une partie du corps vers d'autres parties de ce même corps),
- par radiation (la chaleur est transférée à distance par rayonnement électromagnétique).

Les aspects convectifs sont pris en compte par le code de thermohydraulique. Les aspects conductifs et radiatifs en milieu transparent sont traités par le code SYRTHES. L'étude peut être complétée par la prise en compte du rayonnement en milieu semi transparent si le code fluide possède une telle potentialité.

L'application des grands principes permet d'établir, pour le solide, une équation continue du type suivant :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -div\ \vec{q} + \Phi$$

où ρ et C_p désignent respectivement la masse volumique et la chaleur spécifique du matériau. La température T est l'inconnue. Le terme à gauche de l'équation constitue la dépendance temporelle du phénomène, le membre de droite caractérise la façon dont se propage l'information au sein du milieu continu ($\vec{q}$ représente le flux de chaleur), Φ désigne ici un terme source volumique.

Cette équation continue régit le phénomène de transmission de la chaleur au sein d'un milieu à comportement simple. A la frontière du domaine, plusieurs types de phénomènes peuvent être séparément ou simultanément présents. Pour la modélisation de ces phénomènes une panoplie de conditions aux limites est offerte à l'utilisateur et est détaillée dans un paragraphe ultérieur de ce chapitre.

Cette équation peut prendre, suivant les approximations que l'utilisateur est prêt à faire en fonction de son cas, des formes très diverses. On détaillera en particulier la situation où des caractéristiques géométriques peuvent conduire à restreindre la simulation sur un domaine bidimensionnel ou axisymétrique.

3.1.2 Les aspects géométriques

Fondamentalement la dimension de l'espace à laquelle sont confrontés les utilisateurs est tridimensionnelle. Il peut cependant arriver que le cas traité par l'utilisateur comporte la propriété d'indépendance suivant une des directions de l'espace. C'est le plus souvent une approximation dont la validité est proportionnelle à la "richesse" de l'utilisateur. Il est alors tentant de ne résoudre le phénomène que dans le sous-espace correspondant, ce qui améliore grandement la facilité (et le coût) de mise en œuvre.

Dans cette optique (et pour ne pas inhiber les potentialités des codes de thermohydraulique auxquels SYRTHES peut être couplé), la possibilité d'effectuer des simulations bidimensionnelles cartésiennes et axisymétriques est proposée.

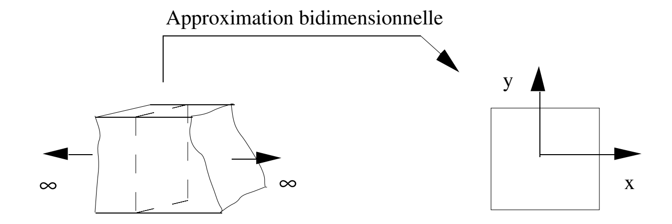


FIG. 3.1 – Approximation bidimensionnelle

3.1.2.a Bidimensionnel cartésien

L'équation s'écrit alors dans un espace bidimensionnel (x, y), la température, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites et tous les éléments relatifs à la simulation sont donc dépendant de deux variables d'espace uniquement. La discrétisation de l'équation (2-1) est effectuée sur un maillage éléments finis (fourni par l'utilisateur) de type triangulaire à 6 noeuds généré par exemple par le logiciel SIMAIL ou par le logiciel IDEAS-MS. On précise que les arêtes de ces triangles sont droites.

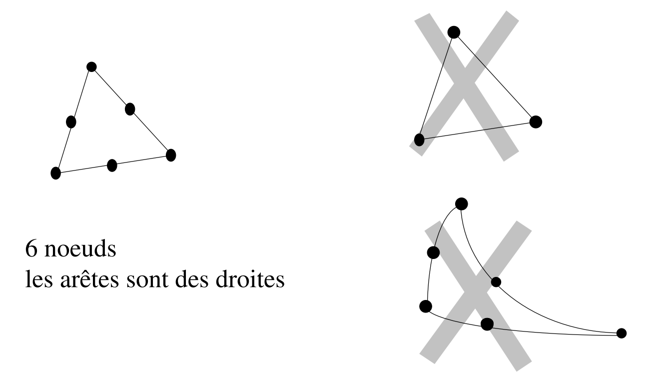


FIG. 3.2 – Type d'élément à utiliser en 2D

3.1.2.b Bidimensionnel axisymétrique

Un autre cas de figure exploite le fait que dans certains problèmes une symétrie de révolution existe dans une pièce. Il est par exemple impossible de différencier une tranche plutôt qu'une autre à la fois d'un point de vue comportement, géométrie ou sollicitation. On calcule alors les phénomènes thermiques dans une tranche d'épaisseur fictivement nulle, l'aspect tridimensionnel étant intégré implicitement dans la forme de l'équation. Là encore, la réduction du problème tridimensionnel à un espace bidimensionnel conduit à des calculs beaucoup moins lourds et tout aussi exacts sous réserve bien sûr que l'hypothèse de base soit effectivement valide.

Il est à noter que dans SYRTHES l'utilisateur peut choisir son axe d'axisymétrie Ox ou Oy.

Là encore la discrétisation repose sur les mêmes éléments triangulaires à 6 nœuds.

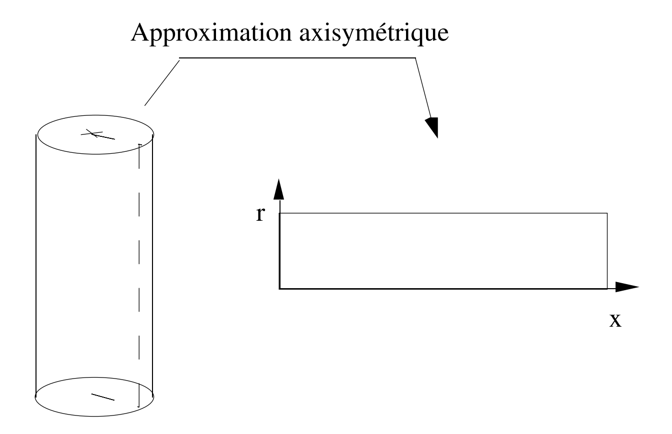


Fig. 3.3 – Approximation axisymétrique

3.1.2.c Tridimensionnel

Dans la mesure où l'espace de résolution est compatible avec l'espace du phénomène, aucune restriction ou approximation n'est nécessaire. La discrétisation est effectuée à l'aide d'un maillage non structuré de type tétraèdrique. Ces tétraèdres comportent 10 nœuds et n'admettent que des faces planes.
Le maillage tétraèdrique est généré par l'utilisateur à l'aide des mailleurs Simail ou Ideas-MS ou tout autre logiciel à la condition de remettre les informations relatives à la géométrie à l'un de ces deux formats ou au format propre à Syrthes (cf. B).

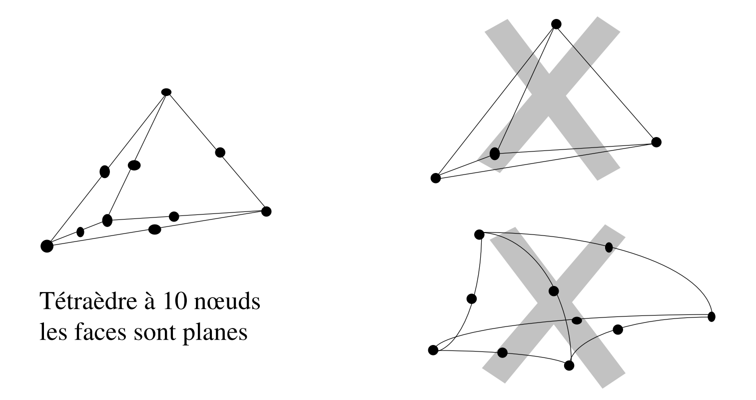


Fig. 3.4 – Type d'éléments autorisés en 3D

3.1.3 Les matériaux traités

Tous les corps conduisent la chaleur. Cependant leur comportement conductif peut varier considérablement d'un corps à l'autre. Il faut donc savoir différencier les milieux qui interviennent dans un problème. Parfois leur comportement devient même dépendant de façon continue de l'espace, c'est par exemple le cas lorsque leurs caractéristiques dépendent de variables locales. Souvent c'est la température locale qui va modifier les caractéristiques du matériau. Dans ce cas, l'équation (2-1) devient en toute rigueur non linéaire, mais la

variation des caractéristiques définissant le matériau est la plupart du temps suffisamment faible (en temps) pour pouvoir utiliser les caractéristiques correspondant à la température locale du pas de temps précédent.

Parmi les propriétés qui définissent un milieu conducteur on trouve la masse volumique, la chaleur spécifique, et la conductivité. On a donc :
- $\rho = rho(x, y, z, t, T, \dots)$
- $C_p = C_p(x, y, z, t, T, \dots)$
- $k = k(x, y, z, t, T, \dots)$

Ces propriétés sont définies de façon simple, par mots-clés lorsqu'elles sont constantes sur le domaine ou des sous-domaines bien identifiés. Dans les cas plus complexes, un sous-programme (*cphyso.F*) est à la disposition de l'utilisateur pour définir en chaque point du domaine ces différentes propriétés.

D'un point de vue modélisation, on relie le flux (grandeur fondamentalement continue) aux composantes du gradient local de température par l'intermédiaire de la conductivité (notée k). Suivant les matériaux, cette grandeur est scalaire ou bien matricielle. Les paragraphes suivants examinent les différentes possibilités qui peuvent se présenter aux utilisateurs.

3.1.3.a Matériaux à comportement isotropes

Ce cas est le plus couramment rencontré. Il correspond à un solide qui, soumis à une sollicitation ponctuelle, va diffuser cette information de façon isotrope dans l'espace (les isothermes forment des cercles concentriques en dimension 2, et sphériques en dimension 3). Cela se traduit par une colinéarité du flux avec le gradient de température. L'expression du flux s'exprime donc par la très classique loi de Fourier :

$$\vec{q} = -k \ \overrightarrow{grad}\, T$$

L'utilisateur n'a donc besoin de définir qu'un scalaire en chaque nœud de son maillage (ou même qu'un seul scalaire, lorsque la conductivité est identique sur tout le domaine). Ce choix est bien sûr celui qui est le plus économique en place mémoire, et qui donne lieu aux calculs les moins lourds. Ce choix représentera la très grande majorité des applications.

3.1.3.b Propriétés d'orthotropie

Il peut arriver que la propagation de la chaleur dans un corps ne soit pas de type isotrope, c'est-à-dire que suite à une sollicitation en un endroit de l'espace, une direction privilégiée de transmission de la chaleur existe. Cela peut être le cas dans les matériaux composites. Lorsque les propriétés conductrices du matériau sont alignées avec les axes du repère, on parle de matériaux à comportement orthotrope.
La conductivité est alors représentée par une matrice du type suivant :

$$K = \begin{pmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{pmatrix}$$

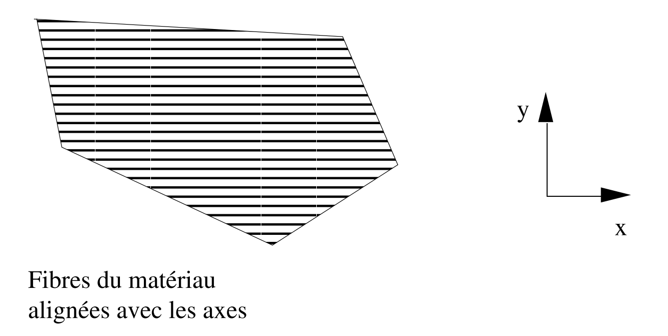


FIG. 3.5 – Exemple de matériau à comportement orthotrope

Dans cette matrice, chaque coefficient (k_{xx} par exemple) reste variable en temps, en espace,. . .et peut dépendre de tous les paramètres locaux accessibles à l'utilisateur.

3.1.3.c Propriétés d'anisotropie

Cette fonctionnalité étend les précédentes au cas des matériaux anisotropes, c'est-à-dire lorsque les différents comportements conductifs du matériau ne peuvent plus s'exprimer suivant les axes du repère global choisi pour le calcul. La figure suivante présente une structure dont le comportement pourrait être anisotrope.

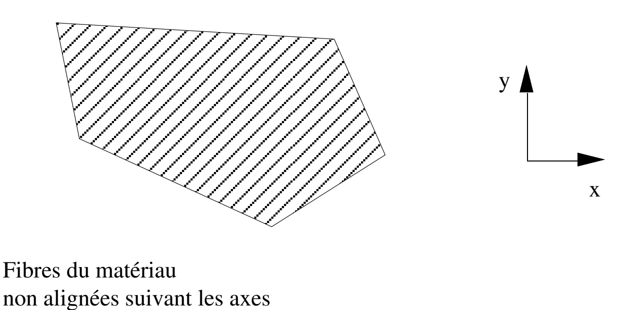


FIG. 3.6 – Exemple de matériau à comportement anisotrope

La matrice de conductivité prend alors la forme suivante :

$$K = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ & k_{yy} & k_{yz} \\ & & k_{zz} \end{pmatrix}$$

Remarques : Dans la mesure où cette matrice est symétrique et positive, il existe toujours un repère dans lequel elle s'exprime de façon diagonale (c'est le repère propre). On utilise cette propriété pour entrer les données lorsque l'on propose le recours aux mots-clés ; en effet, souvent l'utilisateur connaît l'expression de sa matrice de conductivité dans un repère propre lié à la pièce considérée. Un sous-programme utilisateur permet cependant d'accéder à la mise en place du comportement le plus général possible.

Ce dernier cas constitue une généralisation des cas cités précédemment. Cependant, le recours à ce modèle nécessite des ressources informatiques, à la fois en terme de stockage et de coût calcul, plus importantes, ce qui rend intéressant la distinction entre les différents comportements.

3.1.4 Conditions initiales

La température au sein du solide doit être donnée à un instant t (qui est généralement pris comme origine). Cette distribution peut être continue ou discontinue, mais physiquement, compte tenu de la nature régularisante de l'opérateur de diffusion, une distribution continue apparaît rapidement.

Pour l'utilisateur, le plus souvent, il s'avère que la température initiale est supposée constante sur le domaine. Pour faciliter l'introduction de cette donnée, un mot-clé permet d'imposer une valeur constante sur le domaine entier ou sur des sous-domaines définis à l'aide de références.

En dernier recours, si le cas traité demande d'imposer une condition initiale très spécifique, l'utilisateur peut utiliser le sous-programme utilisateur (*initmp.F*) prévu à cet effet. On trouvera plus de détails sur l'utilisation des mots-clés ou du sous-programme utilisateur dans les chapitres 5 et 7.

3.1.5 Les conditions aux limites

De façon à décrire complètement le problème et être à même de le résoudre numériquement, il reste à préciser les différentes conditions qui affectent les frontières du domaine. Les conditions aux limites proposées dans SYRTHES sont très classiques. Elles sont reprises dans ce paragraphe. Les conditions aux limites peuvent être de plusieurs types :

- **Dirichlet** (valeur imposée de la température)
  On considère qu'à la fontière, la température est constante ou bien variable en fonction du temps et de l'espace mais de façon connue de la part de l'utilisateur. C'est une condition relativement simple à introduire même s'il faut souligner qu'elle constitue souvent une approximation. En effet, d'un point de vue expérimental (même en laboratoire), prescrire la température d'une surface constitue un exercice fort difficile.

  Selon le cas de figure, l'entrée des données est plus ou moins difficile. Si la température à imposer est constante sur toute une partie identifiée de la frontière, on pourra repérer les nœuds par des références au sein des mailleurs. Les mots-clés concernant les conditions de Dirichlet permettront d'affecter leur valeur aux nœuds par simple remplissage du fichier de mots-clé (voir chapitre 6). Si le cas est plus complexe, on aura alors recours à un sous-programme utilisateur *limsol.F ou limfso.F*, dont l'emploi est décrit dans le chapitre 7.

- **flux**
  Une autre condition à la limite très usitée est la condition de flux imposé. Le flux peut être imposé sur des nœuds ou bien des faces. Même si le choix d'imposer les conditions sur

les faces apparaît plus physique (cf. 3.5), l'utilisateur qui ne disposera pas d'informations sur les faces au niveau du mailleur pourra imposer le flux sur les nœuds.

De la même façon que pour les conditions de Dirichlet, suivant la complexité du chargement souhaité, l'utilisateur peut avoir recours au fichier de mot-clés (voir chapitre 6), ou bien à un sous-programme utilisateur qui permet d'appréhender les cas les plus complexes ; mais en contre partie, il faut recompiler le sous-programme en question et regénérer l'exécutable. On trouvera dans le chapitre 7 une description précise de l'utilisation du sous-programme correspondant dont le nom est *limsol.F ou limfso.F*

- **coefficient d'échange**
  Dans de nombreux cas physiques, il arrive que le flux soit proportionnel à la différence de température qui existe entre la surface (notée T) et la température du milieu dans lequel baigne le solide (notée T_o). Le flux s'exprime alors sous la forme $h(T - T_o)$. La quantité h est appelée le coefficient d'échange thermique. Il a pour unité des W/mK. Dans le cas d'un écoulement forcé, ce paramètre dépend généralement de la vitesse du fluide, de sa nature et des caractéristiques locales.

  Suivant la même logique, selon la complexité du cas à traiter, l'utilisateur aura recours au fichier de mots-clés (dont l'utilisation est précisée au chapitre 6), ou à un sous-programme utilisateur *limsol.F ou limfso.F* dont l'utilisation est décrite au chapitre 7. Il faut souligner que l'utilisateur devra entrer alors deux grandeurs en chaque point soumis à ce type d'échange. En premier lieu, la température du milieu extérieur, le second paramètre représentant le coefficient d'échange.

- **rayonnement infini**
  Il s'agit ici d'une condition à la limite qui ne doit pas être confondue avec le calcul du rayonnement thermique en milieu confiné. Sur le bord du domaine, on calcule simplement un échange qui correspond aux pertes (ou gains) par rayonnement de la pièce vis-à-vis de son environnement extérieur global.

- **symétrie** Dans de nombreuses études, le domaine de calcul peut-être avantageusement réduit lorsque le domaine présente des symétrie. Le calcul pourra alors se faire sur 1/2, 1/4 ou 1/8 (en dimension 3) de domaine. Du point de vue de la conduction, une condition de symétrie est équivalente à une condition de type flux nul. Cette condition ne fait donc pas l'objet de paramètres particuliers.
  En revanche, nous verrons qu'il est obligatoire de la spécifier dans le cas du rayonnement thermique.

- **périodicité**
  Les conditions de périodicité peuvent s'appliquer entre deux faces d'orientations quelconques, la transformation géométrique permettant de les relier étant une translation ou une rotation (ou composée de rotations suivant les 3 directions d'espace) quelconque dans l'espace.
  On présente figure 3.7 le cas de la réduction d'un domaine de calcul grâce à l'utilisation des conditions de périodicité suivant une rotation.
  Il est à noter qu'il est par ailleurs possible de traiter simultanément plusieurs directions

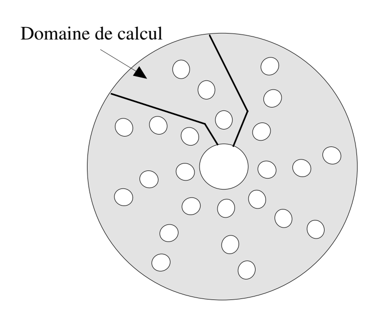


Fig. 3.7 – Périodicité de type rotation

périodiques (jusqu'à 2 en dimension 2 et 3 en dimension 3). Ceci permet par exemple de traiter aisément le cas d'une plaque de grande dimension possédant un motif périodique.

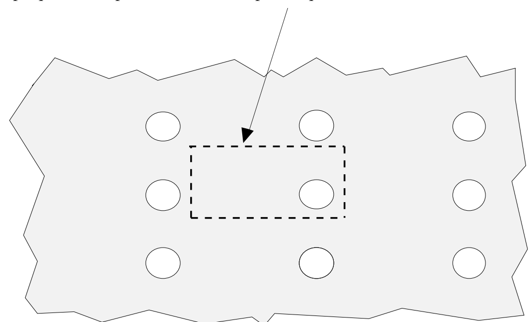


Fig. 3.8 – Cas d'application de la périodicité dans 2 directions simultanées

Dans l'exemple présenté figure 3.8, la réduction du domaine de calcul au motif périodique nécessite la prise en compte de la périodicité suivant les deux directions :

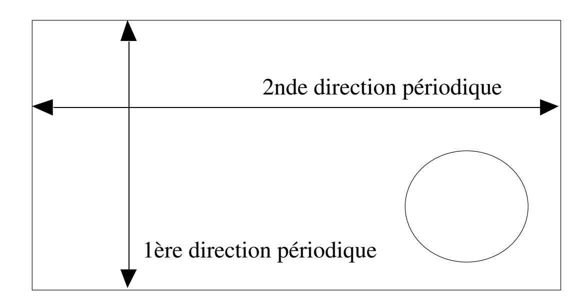


Fig. 3.9 – Cas d'application de la périodicité dans 2 directions simultanées

Il faut bien être conscient que, dans ce cas, les coins du domaine sont des points extrêmement particuliers puisque chacun d'eux est soumis simultanément à la périodicité dans les **2** directions : il faut alors tenir compte des contributions des éléments voisins dans 3 directions différentes. Ce principe est exposé par la figure ci-dessous (il est à noter que dans le cas de la dimension 3, le problème est similaire si ce n'est que le traitement des coins nécessite la prise en compte des 7 éléments voisins).

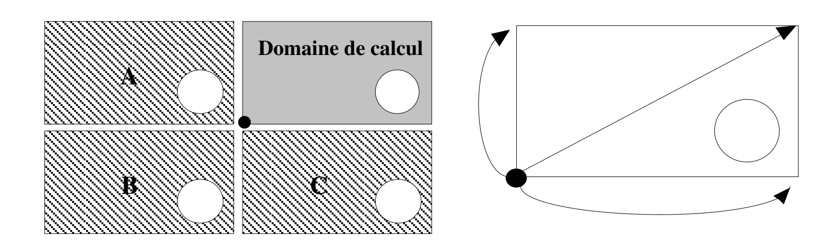


Fig. 3.10 – Traitements particuliers des noeuds de coin

En dimension 3, il peut être nécessaire de prendre en compte une périodicité suivant 3 directions différentes.

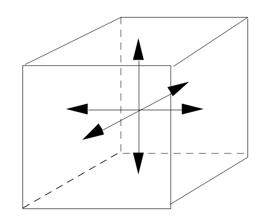


Fig. 3.11 – Périodicité suivant trois directions

3.1.6 Les flux volumiques

Parfois, certains mécanismes physiques entraînent une apparition de chaleur au sein du solide. C'est par exemple le cas dans les pièces métalliques soumises à des effets électromagnétiques. L'effet joule qui en résulte peut être modélisé par un flux volumique.

Syrthes permet la prise en compte de flux volumiques définis sur les nœuds ou les éléments de tout ou partie de domaine. Ils peuvent être variables en espace et en temps. Le cas simple d'un flux volumique constant sur un sous-domaine bien identifié peut être traité à l'aide du fichier de mots-clés (voir chapitre 6). Pour les cas plus complexes, le recours à un sous-programme utilisateur *cfluvs.F* permet par exemple la prise en compte d'un flux volumique variable en temps, en température,...

3.1.7 Les résistances de contact

Dans les mécanismes industriels, il arrive souvent que les pièces solides appartenant à un système soient composées de plusieurs matériaux. Ces matériaux sont parfois collés ou vissés les uns aux autres, un transfert thermique s'opère donc entre ces domaines. Une étude plus attentive du transfert thermique montre cependant que, bien que semblant optiquement parfaitement joints, les matériaux ne sont pas suffisamment intimement imbriqués pour pouvoir considérer que le milieu reste continu. Il arrive par exemple qu'un insterstice d'air rende discontinu le champ de température. Le flux, lui, bien sûr reste toujours une notion continue.

Le recours à ce type de modélisation est également utilisé pour la simulation de défauts dans une pièce, ou lors de la représentation "thermique" d'une fissure. On ne peut alors

plus considérer que la pièce est continue, mais il est également impossible de considérer une indépendance totale entre les deux bords, en effet un flux de chaleur continue à transiter au travers de l'interstice.

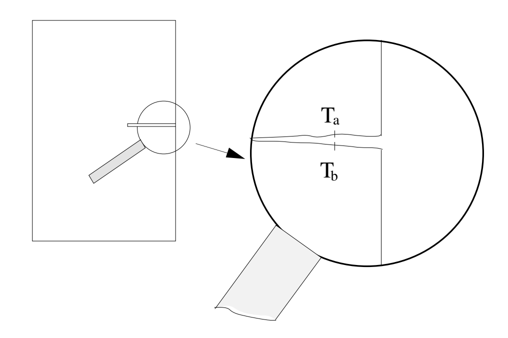


FIG. 3.12 – Résistances de contact

On introduit alors la notion de résistance de contact entre les deux milieux. Il s'agit en fait d'une condition d'échange entre les deux faces en contact où la condition extérieure est constituée par la température de la face en regard. Contrairement au cas des conditions d'échange décrites précédemment, la température des faces en regard reste une inconnue du problème, et est susceptible de varier en chaque point.

On a alors les relations

$$\begin{cases} g\,(T_a - T_b) = k_a \; grad\,T \\ g\,(T_b - T_a) = k_b \; grad\,T \end{cases}$$

les températures T_a et T_b restent des inconnues du problème.

On utilise soit le fichier de mots-clés décrit au chapitre 6, ou le sous-programme utilisateur *limsol.F* pour imposer la valeur de la résistance de contact.

Avertissement Dans la pratique, la détermination du coefficient g est très délicate. On conçoit qu'une part non négligeable d'empirisme doit être introduite, puisqu'il faut quantifier l'imbrication des deux milieux en regard. Cette fonctionnalité nécessite donc un certain savoir-faire.

3.2 Le rayonnement thermique

3.2.1 Généralités

Tout corps émet continuellement de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique sur une gamme de fréquence très étendue. Ce rayonnement thermique est en fait lié à l'énergie interne du corps. Plus l'énergie interne est élevée et plus l'agitation électronique est importante et s'accompagne d'une émission de particules ultra-relativistes. Inversement, l'énergie amenée sous forme de rayonnement électromagnétique va exciter les électrons présents dans la matière et augmenter l'énergie interne du système.

Ce mode de transfert de chaleur est assez différent de ce que l'on peut observer dans le cas de la convection et de la conduction dans la mesure où il n'est pas nécessaire de faire intervenir de support matériel[2]. Au lieu d'un simple vecteur flux[3] comme dans le cas de conduction, le flux radiatif correspond à la somme des émissions radiatives de toutes les directions de l'espace. Cela conduit à une formulation intégrale. Le couplage des trois modes de transfert (convection, conduction et rayonnement) entraîne la résolution d'un problème intégrodifférentiel, souvent très difficile à résoudre.

Dans une enceinte, des échanges radiatifs complexes interviennent lorsque le rayonnement quitte une facette pour atteindre une position de l'espace où le rayonnement est partiellement réfléchi et réémis, et ce de multiples fois.

Heureusement dans de nombreuses situations, des approximations simplificatrices sont envisageables, tout en restant rigoureux.

On rappelle ici les choix qui ont été faits ainsi que le cadre dans lequel on se place lorsque l'on prend en compte le rayonnement thermique dans SYRTHES.

- on se limite au traitement du rayonnement en milieu transparent. Il s'agit donc d'échanges radiatifs de parois à parois,
- les corps sont supposés opaques,
- les corps sont à comportement diffus,
- les corps sont à comportement gris par bande,

Pour plus de détails sur ces notions on pourra se reporter à la référence [5].

3.2.2 Le traitement du rayonnement thermique dans SYRTHES

A l'aide de ces différentes approximations, souvent justifiées, et d'une discrétisation spatiale et temporelle, on formule le problème sous forme matricielle.

$$\begin{pmatrix} 1-\rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \cdots & -\rho_1 F_{1N} \\ -\rho_2 F_{21} & 1-\rho_2 F_{22} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\rho_N F_{N1} & \cdots & \vdots & 1-\rho_N F_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ . \\ J_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ . \\ E_N \end{pmatrix}$$

[2] L'énergie émise sous forme de rayonnement se propage très bien dans le vide

[3] Ce qui conduit à une notion d'équation différentielle

Dans le système précédent, E_i représente l'émittance de la facette i et ρ_i la réflectivité ($\rho_i = 1 - \varepsilon_i$, ε étant l'émissivité).
Les inconnues sont les radiosités[4] (notées J dans le système précédent) en chacune des N facettes du maillage de rayonnement considéré. Dans la formule précédente, intervient une grandeur purement géométrique[5] notée F_{ij} qui peut être interprétée physiquement comme la proportion d'énergie qui partant d'une facette i atteindra la facette j. On a :

$$F_{ij} = \frac{1}{S_i} \int_{x \in S_i} \int_{y \in S_j} \frac{cos\theta_1 \, cos\theta_2}{\pi r^2} \; V(x,y) \; dy \; dx$$

avec S_i la surface de la facette i, x et y deux points parcourant les facettes i et j, θ_1 et θ_2 les angles entre les normales aux facettes et la ligne de vue, r la distance entre les points x et y et $V(x,y)$ la fonction de visibilité des points x et y. Cette intégrale quadruple est souvent fort difficile à estimer.
A nouveau, l'utilisateur pourra se reporter à la référence [5] pour les détails concernant ces aspects.

3.2.3 Eléments de validation

Le traitement du rayonnement thermique dans SYRTHES a été validé sur de nombreuses configurations.

Une première étape a été de valider soigneusement le calcul des facteurs de forme qui est un point clé du traitement du rayonnement. Des tests comparatifs ont été effectués sur certaines configurations où il existe une expression analytique des facteurs de forme. Ensuite des configurations plus complexes avec notamment la prise en compte d'obstacles ont été traitées et ont permis la validation du calcul des ombrages.
Dans un second temps, les tests ont porté sur le solveur du système radiatif. Là encore, les solutions proposées par SYRTHES ont été comparées à des solutions analytiques. Dans tous les cas étudiés, on a pu constater que l'on obtenait des résultats très satisfaisants à l'aide de SYRTHES.
L'utilisateur pourra se reporter à la référence [6] qui détaille ces importants aspects de validation.

3.2.4 Géométries

Tout comme pour la conduction, SYRTHES permet de résoudre le rayonnement thermique dans les géométries 2D, 2D axisymétriques et 3D.
Le traitement des configurations axisymétriques a fait l'objet de développements spécifiques qui permettent de s'affranchir de la reconstitution du domaine tridimensionnel pour le calcul des facteurs de forme. On dispose ainsi d'une méthode efficace et rapide qui tire pleinement profit de l'approximation d'axisymétrie.
Dans certaines applications, le domaine de calcul peut avantageusement être réduit en considérant des plans de symétrie ou des conditions périodiques. Le module de rayonnement admet la prise en compte des symétries multiples (jusqu'à 2 en dimension 2 et 3

[4] On rappelle que la radiosité est le flux de rayonnement qui s'échappe d'une facette.
[5] Cette grandeur est souvent appellée facteur de forme ou facteur de vue

en dimension 3). On notera cependant que les plans de symétries doivent toujours être disposés de telle sorte que le domaine virtuellement reconstitué soit fermé. En particulier, deux plans de symétrie se faisant face ne sont pas autorisés puisque le motif se reproduit alors à l'infini.

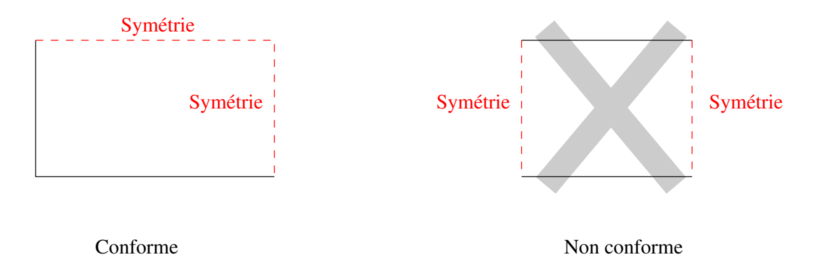


FIG. 3.13 – Symétries pour le rayonnement

En ce qui concerne la périodicité, il s'agit obligatoirement d'une périodicité de rotation (la seule conduisant à un domaine fermé).
La section angulaire maillée est une division entière de 360°. Ainsi, on pourra choisir de modéliser 1/2, 1/3, 1/4,...du domaine complet.

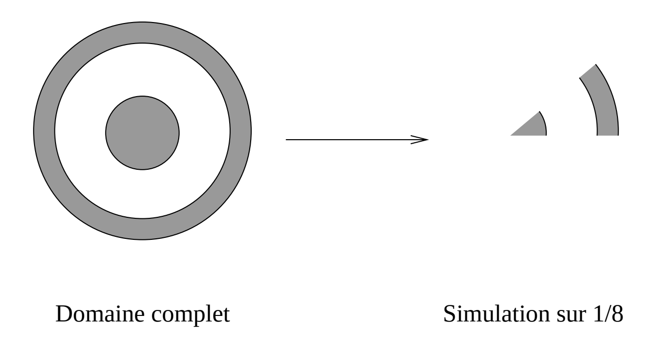


FIG. 3.14 – Périodicité pour le rayonnement

3.2.5 Propriétés physiques

SYRTHES permet de prendre en compte le rayonnement thermique pour des corps gris par bande. L'utilisateur peut ainsi définir plusieurs bandes spectrales et fournir l'émissivité pour chacune.
L'émissivité peut également être variable en fonction de l'espace, de la température, etc...

3.2.6 Conditions aux limites

Pour le rayonnement, la condition naturelle est d'être en contact avec une paroi solide pour la laquelle on résout les transferts conductifs. Cependant, certaines configurations font apparaître le besoin de disposer de conditions aux limites spécifiques au rayonnement. Le cas le plus fréquent est la présence d'ouvertures dans le domaine de simulation : ce sont par exemple le cas des cavités alimentées par des conduits.

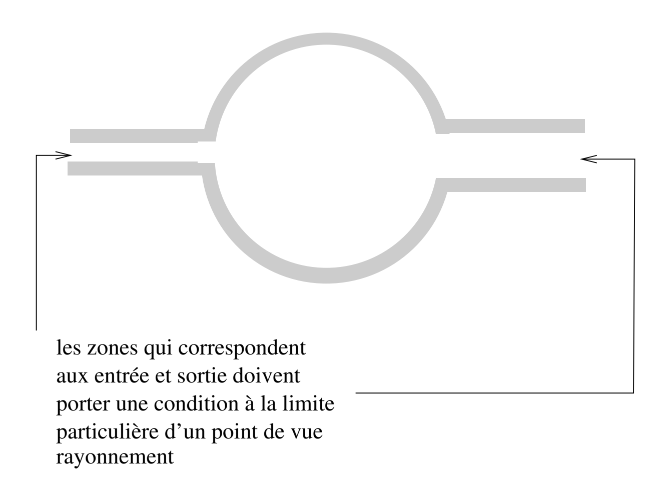


Fig. 3.15 – Conditions aux limites spécifiques au rayonnement

Le maillage de rayonnement peut être muni des conditions suivantes :

- **couplage avec la conduction**
  C'est la condition que doit porter la majorité des facettes,

- **température imposée**
  C'est la condition qui est généralement utilisée pour fermer le domaine de calcul du rayonnement,

- **flux imposé**
  Dans le cas des matériaux gris par bande, le flux est fourni pour chacune des bandes spectrales,

3.3 Couplage avec un code de thermohydraulique

Comme nous l'avons vu en introduction, notre objectif est aussi de proposer un outil informatique, le plus souple possible pour l'appréhension des phénomènes thermiques couplés entre fluide et solide.
La prise en compte des phénomènes thermiques dans le solide en contact avec le fluide présente divers intérêts que nous nous proposons d'évoquer maintenant.

3.3.1 Une meilleure appréhension des conditions aux limites pour le fluide ou pour le solide

Lorsque l'on met en oeuvre une simulation numérique d'un phénomène, il faut bien sûr modéliser et résoudre le phénomène à l'intérieur du domaine concerné, mais aussi prendre en compte les conditions sur sa frontière. Les conditions qui règnent au niveau de la frontière du solide sont la plupart du temps mal connues ou fort difficiles à appréhender. Prendre en compte le domaine solide peut, dans une bonne proportion des cas, lever la difficulté, ou tout du moins la réduire fortement. Par exemple, lorsqu'une conduite est

calorifugée thermiquement, imposer une condition de flux nul sur la paroi externe est quasiment rigoureux, par contre, si la pièce est épaisse ou bien si l'on cherche à évaluer un transitoire thermique, imposer une condition de flux nul au niveau de la frontière fluide (c'est à dire à l'interface entre fluide et solide) peut conduire à commettre une erreur grossière.

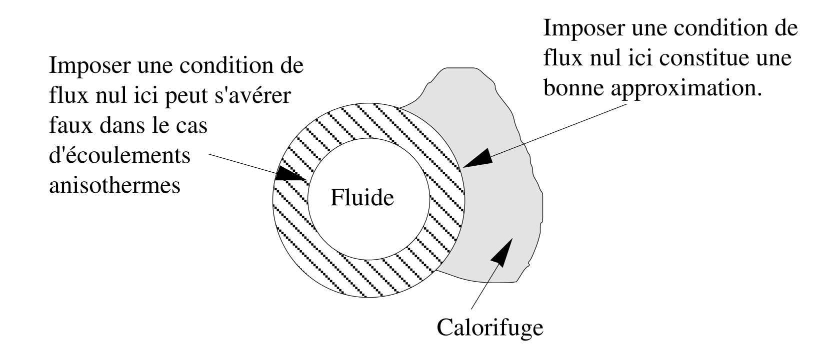


FIG. 3.16 – Conduite calorifugée en présence d'un écoulement anisotherme

Dans les configurations industrielles sur lesquelles le couplage thermique fluide-solide est amené à être utilisé, on peut avoir accès aux conditions à imposer en paroi externe mais il est extrêmement coûteux, voir impossible de savoir quelles valeurs imposer en paroi interne.

La même constatation (bien que vue sous un autre angle) peut être faite lors de la phase de "validation" de la simulation thermohydraulique. Dans les configurations industrielles, il est beaucoup plus aisé de placer des capteurs sur les faces externes des parois, qu'au sein du fluide lui-même, ou sur la face interne. Parfois l'instrumentation interne (capteur ou thermocouple) s'avère même hors de question. On peut espérer que si le comportement de l'écoulement fluide est bien prédit, après conduction à travers la paroi, les valeurs de température devraient correspondre à celles obtenues sur site. Parfois lorsqu'un flux volumique de chaleur existe au sein du solide (effet Joule par exemple) il est très difficile d'intuiter une condition à la frontière du fluide qui correspondrait à un tel comportement.

3.3.2 Prise en compte des transitoires thermiques

L'interaction thermique entre fluide et solide est fondamentale dans le cas des chocs thermiques présents de façon très courante dans les processus industriels (par exemple la robinetterie nucléaire).

Prenons le cas d'un choc thermique (élévation brutale de la température du fluide) dans une conduite. L'inertie thermique du solide conduit à un réchauffement graduel des parois et inversement au refroidissement pariétal du fluide. Cela conduit au bout d'une certaine longueur de conduite à étaler le front thermique de façon considérable. En bout de ligne, le choc thermique vu par un composant sensible est très amoindri et peut conduire à des valeurs compatibles avec des normes de sécurité contrairement à l'attitude beaucoup trop conservatrice d'une paroi sans inertie thermique.

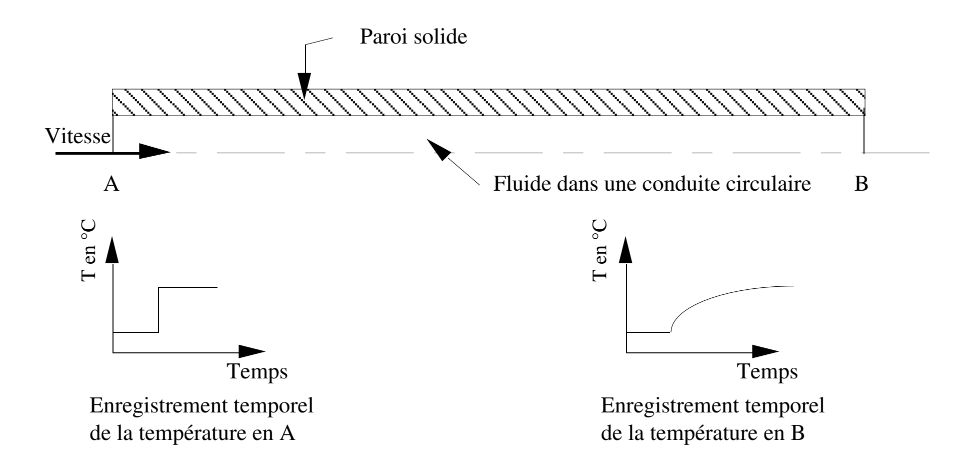


FIG. 3.17 – Atténuation d'un choc thermique liée à l'inertie thermique

3.3.3 Accès au champ thermique dans le solide

L'intérêt d'une simulation de couplage thermique fluide-solide peut parfois résider dans le fait d'avoir accès au champ de température solide. Dans ce cadre, l'intérêt d'une simulation ayant recours au couplage thermique avec le fluide est alors d'imposer les bonnes conditions aux limites à la frontière du solide.

Cela peut être le cas par exemple pour un processus de refroidissement d'une pièce métallique par jet d'air ou par des mécanismes de convection naturelle. Une approche classique pour les thermiciens du solide consiste à approximer le fluide par des lois d'échange. Malheureusement, imposer ces coefficients conduit souvent à commettre des erreurs grossières dans la mesure où les paramètres locaux que sont la température fluide et le coefficient d'échange associé sont souvent très ardus à déterminer.

Une fois le champ thermique obtenu dans le solide,

- on peut analyser l'efficacité du système de refroidissement employé et optimiser les processus,
- on est capable de déterminer l'existence de points chauds et les localiser. En effet il est souvent préférable de minimiser l'apparition de points chauds qui peuvent conduire à une détérioration du composant (c'est par exemple le cas en électronique).
- enfin, par post-traitement on peut déterminer les contraintes mécaniques d'origine thermique à l'aide de codes de mécanique.
  SYRTHES permet de sortir ses résultats au format MED, format qui pourra ensuite être lu par un code de mécanique, par exemple CODE_ASTER. Par ailleurs, un utilitaire, *syrthes2med*, permet de transformer les fichiers de résultats issus de SYRTHES au format propriétaire en une base de données au format MED (voir page 43).

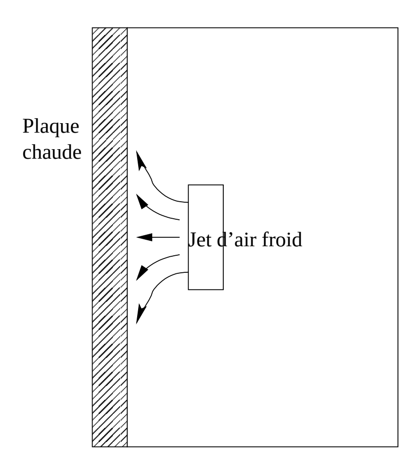


FIG. 3.18 – Exemple : refroidissement d'une plaque

3.4 SYRTHES : un code basé sur la modularité

On essaie tout d'abord de donner dans ce paragraphe un bref aperçu des grands choix structurels retenus, ainsi que les motivations sous-jacentes. On insistera, sur les potentialités et la souplesse que cela peut procurer dans la mise en œuvre d'une simulation d'un cas industriel.
Ce chapitre s'arrêtera aussi sur les principales spécificités de SYRTHES et sur les conventions qui ont été choisies. On reviendra notamment sur les notions les plus délicates à appréhender (références, périodicités,...) pour expliquer les concepts et les choix retenus dans le code.

3.4.1 Couplages SYRTHES / code fluide

Considérons un écoulement fluide en contact avec un solide. L'application des principes généraux de conservation de l'énergie, de la masse, et de la quantité de mouvement conduit à l'écriture de relations générales. Si l'on s'intéresse plus particulièrement au phénomène thermique, on peut alors distinguer différentes "régions" illustrées par le schéma suivant leur comportement.

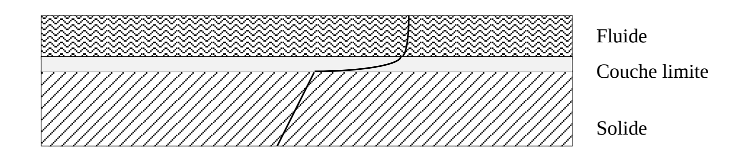


FIG. 3.19 – Les différentes régions à prendre en compte

3.4.1.a La région fluide

On s'intéresse à la température dans une région gouvernée par le fluide. Suivant le régime d'écoulement, une modélisation de la turbulence est utilisée. Cette région relève intégralement du code fluide utilisé. L'utilisation ou non d'un couplage avec le solide ne modifie pas les

équations résolues ou le comportement du code. On aura intérêt à se procurer les documents décrivant le code de thermohydraulique pour de plus amples renseignements sur les phénomènes physiques qu'il est possible de prendre en compte, ainsi que le domaine de validité de chacune des modélisations.

3.4.1.b La région de couche limite

Des phénomènes complexes se produisent dans cette zone. Il faut gérer plusieurs phénomènes (diffusion turbulente, diffusion moléculaire) qui coexistent de façon plus où moins prépondérante suivant la proximité de la paroi et le type d'écoulement considéré. Les gradients des grandeurs à modéliser sont souvent importants ce qui rend difficile leur traitement numérique. De façon classique, plutôt que de résoudre de façon "exacte" les équations qui régissent cette région, on préfère modéliser la zone en reliant des grandeurs situées sur les bords (fluide et solide). Cela revient en fait à proposer une fonction de transfert (locale) entre le domaine solide et le domaine fluide.

Parmi les choix qui s'offraient, (proposition d'une modélisation de la zone, reprendre la démarche utilisée dans le code fluide, etc ...) la modélisation utilisée dans le code fluide lorsque la température de paroi est imposée a été retenue. Ce choix est motivé d'une part par la cohérence que l'on souhaite garder avec les modélisations introduites dans le code fluide standard (on trouvera de plus amples renseignements dans [7], d'autre part par le fait que le traitement de cette région constitue un problème avant tout fluide, et sort donc des limites d'attributions que l'on s'était fixées pour le code SYRTHES.

3.4.1.c La région solide

La température est régie par une équation de diffusion et par les tranferts radiatifs. Les phénomènes qu'il est possible de prendre en compte ont été évoqués précédemment.

3.4.1.d Découplage géométrique, informatique et numérique

Parmi les solutions possibles pour appréhender le problème global, c'est à dire la résolution de la thermique sur les domaines fluide et solide, l'extension de l'équation de la thermique au domaine solide aurait pu être envisagée. En effet, fondamentalement il suffit de supprimer le terme convectif. Cette méthode comporte cependant de nombreux inconvénients lorsque l'on s'engage dans la simulation de systèmes tridimensionnels complexes.
En effet la discrétisation sur un maillage non structuré permet une plus grande souplesse, et permettrait pour certains cas modérément complexes, de mailler de façon continue la pièce solide et le domaine fluide. On disposerait alors d'une seule base de donnée géométrique (nœuds + connectivité) qui pourrait conduire à la résolution d'un seul système (les points du solide étant affectés par une condition particulière : la vitesse à laquelle ils sont soumis reste toujours nulle).

Cette approche comporte toutefois certains inconvénients que l'on peut essayer d'évoquer brièvement :

- **cette solution n'est pas optimale d'un point de vue coût calcul, ou occupation mémoire,**
- **elle ne permet pas la prise en compte de besoins de finesse de discrétisation différents dans les deux domaines,**
- **elle peut devenir très contraignante du point de vue de la réalisation d'un maillage, lorsqu'on s'attaque à des géométries tridimensionnelles complexes,**
- **elle oblige à une restructuration non négligeable du code fluide,**
- **un travail important est à refaire pour chacun des codes fluides pour lesquels on souhaite disposer d'un couplage thermique avec solide.**

Il a donc été décidé de proposer un module thermique solide le plus découplé possible. Les domaines fluide et solide sont maillés de façon totalement indépendante. La seule contrainte (légitime) est d'essayer d'approcher le mieux possible l'interface commune entre fluide et solide. La résolution est également découplée ce qui permet d'utiliser au mieux les méthodes numériques dans chaque domaine. On minimise également la probabilité d'introduire des erreurs dans le code fluide.

3.4.2 Le traitement du rayonnement thermique

La prise en compte du rayonnement thermique se présente comme un "module" de SYRTHES. A nouveau, il a été choisi de découpler informatiquement et géométriquement le traitement du rayonnement thermique. Le module de rayonnement de SYRTHES travaille sur un maillage qui lui est propre. Ce maillage est constitué de segments à 2 nœuds en dimension 2 ou de triangles à 3 nœuds en dimension 3.

Le choix de découpler les discrétisations spatiales pour le traitement de la conduction d'un côté et du rayonnement de l'autre présente plusieurs avantages :

- Les discrétisations pour la résolution de la conduction et du rayonnement sont indépendantes. De cette façon, le degré de finesse des 2 maillages est indépendant. On peut rappeler ici que le traitement du rayonnement thermique est relativement gourmand en place mémoire puisque pour un maillage comprenant N facettes, il faudra stocker $N(N-1)/2$ facteurs de forme. Il est donc important que la nécessité de raffiner une zone pour le traitement de la conduction n'engendre pas un nombre de facettes prohibitif pour le traitement du rayonnement. Un exemple est donné sur la figure 3.20.
- L'utilisation d'un maillage spécifique pour le rayonnement permet de prendre en compte des conditions aux limites particulières. En effet, dans certaines configurations, il est nécessaire de fermer le domaine de calcul en imposant par exemple une température donnée sur certaines facettes. C'est typiquement le cas lorsque le domaine comprend des entrées et des sorties de fluide. Un exemple est présenté figure 3.21. Il s'agit de la modélisation d'une cuve comprenant une entrée de fluide et une sortie. Le contour du maillage nécessaire pour la prise en compte du rayonnement est tracé en pointillés. Cette figure montre la nécessité d'étendre le maillage de rayonnement aux surfaces d'entrée et de sortie. Sur ces zones, une condition à la limite spécifique sera imposée pour la résolution du rayonnement.

Les transferts radiatifs sont donc résolus sur ce maillage indépendant et les flux radiatifs sont ensuite transférés sur le maillage de conduction pour participer aux conditions aux

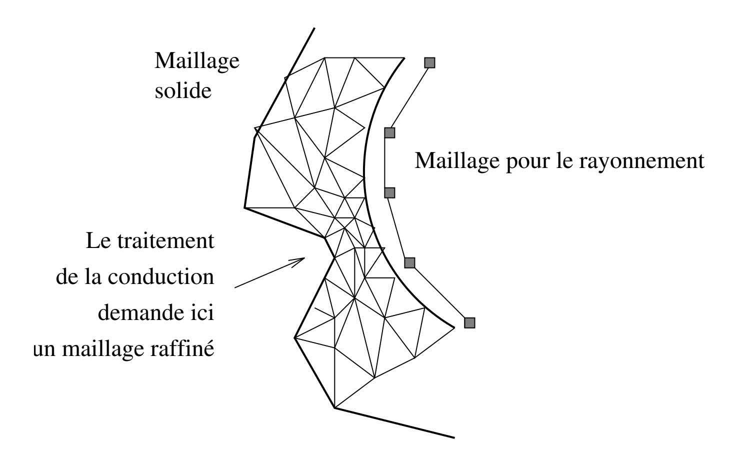


Fig. 3.20 – Indépendance des maillages pour la conduction et le rayonnement

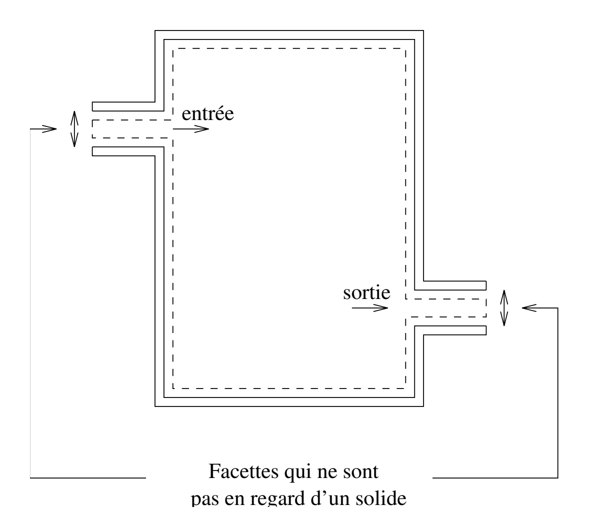


Fig. 3.21 – Traitement des entrées/sorties

limites lors de la résolution de la conduction.

3.4.3 La souplesse procurée par les choix retenus

Les inconvénients des méthodes précédentes, listés dans le précédent paragraphe soulignent partiellement la souplesse que procure la démarche retenue. Les avantages du découplage géométrique, numérique et informatique entre le code fluide et le module thermique solide Syrthes sont donc :

- **une optimisation en coût calcul et en stockage mémoire**
- **une souplesse au niveau de la mise en œuvre d'un cas couplé** maillages fluide et solide peuvent même être générés par deux équipes différentes,
- **de faciliter le chaînage avec d'autres codes numériques**. En mécanique par exemple, le calcul des contraintes d'origine thermique nécessite la connaissance du champ de température dans le solide uniquement,

- **de pouvoir proposer un couplage de** SYRTHES **avec un code de thermohydraulique quelconque à un coût réduit,**
- **de permettre une minimisation du coût de maintenance et d'évolution, puisque les codes fluides et le module** SYRTHES **peuvent évoluer de façon indépendante,**
- **de péréniser le code** SYRTHES **quel que soit le devenir des codes de thermohydraulique.**

Parmi les inconvénients que l'on peut évoquer, on relève le fait que le nombre de fichiers à fournir et de fichiers résultats augmente, ce qui est somme toute assez logique puisque le processus physique global à simuler comprend plus de phénomènes. L'organisation informatique proposée devrait permettre de rendre mineur cet inconvénient.

3.5 L'utilisation des références

3.5.1 Les références sur le maillage de conduction

La plupart des mailleurs offrent la possibilité d'imposer des références (ou couleurs) sur les nœuds et/ou arêtes et/ou faces des maillages.

SYRTHES utilise ces références pour repérer les ensembles de nœuds ou faces soumis à des conditions de même type. Au niveau du solide, l'utilisateur a le choix d'imposer ses conditions aux limites de type flux ou coefficient d'échange (et éventuellement pour les zones couplées avec un fluide) sur les nœuds ou sur les faces de son maillage (cf. 6.2.4). On notera cependant que seule l'imposition des conditions aux limites sur les faces autorise le traitement de conditions discontinues.
En ce qui concerne la condition de type Dirichlet, elle est toujours imposée sur les **nœuds** du maillage (quel que soit le choix qui est fait pour les autres types de conditions).

La figure 3.22 présente un cas type où il est nécessaire de traiter les conditions aux limites sur les facettes. La discontinuité de la condition au niveau de l'arête peut ainsi être prise en compte : suivant la face de laquelle est considérée le nœud de coin, il sera doté d'une condition ou de l'autre.

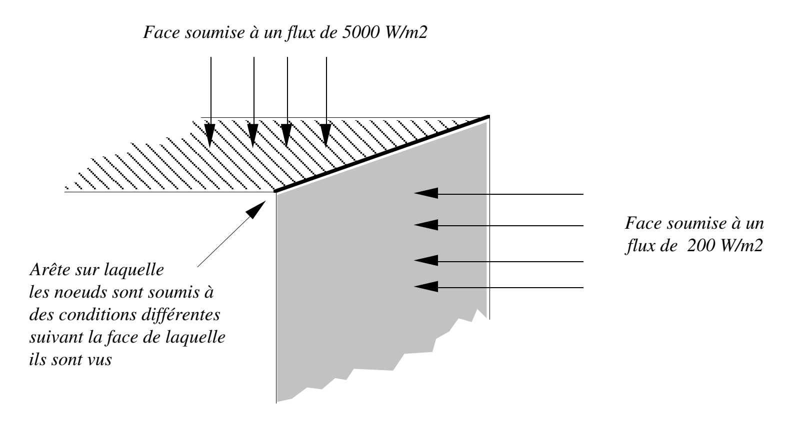


FIG. 3.22 – Avantage d'imposer des conditions aux limites par facette

Les références sont indispensables au code pour l'identification et le dénombrement

- des divers types de conditions aux limites (Dirichlet, flux, coefficient d'échange, résistance de contact, rayonnement infini),
- des flux volumiques,
- des conditions de type périodicité,
- des parties solides couplées avec un fluide,
- des parties solides couplées avec le rayonnement,
- des parties fluides couplées avec un solide.

Les références peuvent également être utilisées pour différencier les divers types de matériaux (conditions physiques différentes). Dans ce cas, il est possible d'utiliser soit des références sur les nœuds, soit des références sur les éléments. Ce dernier choix apparaît le plus naturel et permet de représenter la discontinuité des caractéristiques de deux matériaux différents placés côte-à-côte.
Différencier les matériaux par des références différentes n'est pas une démarche obligatoire et l'utilisateur peut tout à fait imposer les différentes caractéristiques de ses matériaux grâce à un sous-programme utilisateur (en fonction des coordonnées des nœuds par exemple).

De façon similaire, l'ensemble des nœuds soumis à une condition à la limite donnée peut être regroupé sous la même référence, la différenciation des valeurs numériques de ladite condition devra alors se faire par le biais d'un sous-programme utilisateur.

Les références sont obligatoirement des nombres compris entre 1 et 99 pour la version 3.1.
Attention : un nœud portant une référence égale à zéro est considéré comme un nœud non référencé.
Note : *bien qu'il soit toujours possible d'intervenir par le biais de sous-programmes utilisateurs, l'usage des références est vivement conseillé et conduit généralement à une meilleure structuration du maillage et à une facilité de mise en œuvre du calcul accrue. Ceci est d'autant plus vrai que les diverses conditions sont constantes en temps : l'utilisation directe des références permet alors à l'utilisateur de s'affranchir de toute programmation Fortran.*

3.5.1.a Les références dans Simail : choix et conventions

Lorsque le maillage est généré par SIMAIL, les références et les numéros de sous-domaines peuvent être utilisés dans SYRTHES. Chaque nœud sommet est doté de la référence que lui a imposé l'utilisateur ; chaque nœud milieu est affecté de la référence de l'arête sur laquelle il se trouve. En ce qui concerne les références sur les faces, elles ne sont utilisées que lorsque cette option est explicitement demandée par l'utilisateur (cf. mot-clé CONDITIONS LIMITES PAR NOEUD OU PAR FACE). La convention est alors la suivante : en dimension 3, c'est directement la référence de face au sens SIMAIL qui est utilisée, en dimension 2, c'est l'arête qui est considérée comme une face (la référence de l'arête est utilisée comme référence de face).
Les numéros de sous-domaine (références des éléments) ne sont utilisés que si cette option est explicitement demandée par l'utilisateur (cf. mot-clé 'DEFINITION DES PROPRIETES PHYSIQUES PAR').

3.5.1.b Les références dans Ideas : choix et conventions

En ce qui concerne les références (couleurs), les rubriques définissant les nœuds et les éléments du maillage ne comprennent que les références sur les nœuds. Dans le cas où l'utilisateur souhaite malgré tout imposer ses conditions aux limites par facettes, un sous-programme utilisateur est à sa disposition (*inrefa.F*) pour lui permettre de définir les références de chaque facette en fonction de celles de ses nœuds. On pourra se reporter au paragraphe 7.6 pour la description de ce sous-programme.

3.5.1.c Les références dans le cas des fichiers de type SYRTHES : choix et conventions

Les fichiers de type SYRTHES sont généralement utilisés dans le cas des suites de calcul (sauf si l'utilisateur dispose d'un utilitaire permettant l'écriture d'un fichier géométrique à ce format). Le fichier contient les références des nœuds et des éléments, et éventuellement les références des faces (si cette information est disponible).

3.5.2 Les références sur le maillage de rayonnement

Dans le cas du rayonnement, le maillage est surfacique (c'est-à-dire triangles en dimension 3 et segments en dimension 2). SYRTHES utilise alors uniquement les références des éléments. Dans le mailleur IDEAS-MS on parlera de "couleur d'élément" et au niveau de SIMAIL, il s'agira du "numéro de sous-domaine".

3.5.3 Références de nœuds, de faces ou d'élément

On fournit ici un résumé du type de références qu'il faut utiliser en fonction de la condition à imposer.

Condition limite Dirichlet	nœud
Condition limite flux	nœud ou face
Condition limite coefficient d'échange	nœud ou face
Condition limite résistance de contact	nœud ou face
Condition limite rayonnement infini	nœud ou face
Condition limite rayonnement infini	nœud ou face
Zones solides couplées au fluide	nœud ou face
Zones solides couplées au rayonnement	nœud ou face
Zones fluides couplées au solide	face
Périodicité	nœud
Flux volumiques	nœud, élément ou nœuds par élément
Propriétés physiques	nœud, élément ou nœuds par élément

3.6 Conditions initiales, propriétés physiques et conditions aux limites

Le retour d'expérience en matière de modélisation numérique montre que l'utilisation des conditions les plus sophistiquées autorisées par le code ne représente pas la majorité des applications. Il s'est avéré par exemple que dans la plupart des cas, les conditions initiales sont très souvent uniformes sur le domaine (ou tout du moins par bloc) et que les conditions aux limites sont bien souvent constantes dans le temps.

Partant de cette constatation et dans un souci d'amélioration de l'ergonomie du code, il nous a semblé intéressant de proposer l'introduction de certaines conditions directement dans le fichier de paramètres. Une telle méthodologie s'avère assez souple puisqu'elle permet de s'affranchir, dans de nombreuses configurations, de toute écriture de sous-programmes utilisateurs. Par ailleurs, la modification des valeurs des conditions aux limites devient immédiate.

Ce type de définition des conditions aux limites et propriétés physiques s'applique donc à celles qui sont constantes dans le temps et constantes spatialement par bloc. La mise en place des conditions s'appuie alors sur les références des nœuds ou des faces du maillage.

Si la mise en place d'un minimum de références est indispensable pour permettre au code la différentiation des types de conditions aux limites (cf 3.5), la définition des valeurs numériques des conditions ne les utilise pas obligatoirement. Des sous-programmes utilisateurs sont disponibles pour permettre éventuellement la mise en place des conditions spécifiques.

3.6.1 Principe général de fonctionnement

La mise en place d'une condition à la limite se déroule en deux temps :

1. Fournir la liste des références des nœuds ou faces soumis à cette condition. Cette étape est obligatoire, elle permet au code d'établir les conditions qui seront utilisées pour le calcul,
2. Donner la valeur numérique de la condition en fonction de la référence du nœud ou de la face. Cette étape peut être faite directement dans le fichier de données ou par le biais de sous-programmes utilisateurs dans les cas plus complexes.

Pour une condition donnée, on traite les groupes dans l'ordre où ils ont été définis. S'il y a conflit ou recouvrement, le dernier appel au mot-clé écrase les valeurs déjà générées par les appels précédents.

Précisons enfin, que lors de l'utilisation simultanée du fichier de paramètres et des programmes utilisateurs, ces derniers sont toujours prioritaires sur les données entrées par fichier.

L'entrée des conditions dans le fichier de données est décrite au chapitre 6. Dans tous les cas, les nœuds ou faces pour lesquels aucune condition (physique, limite, initiale,...) n'aura été spécifiée prendront les valeurs par défaut (cf. chapitre 6).
On présente ci-dessous un exemple de condition à la limite entrée dans le fichier de données.

```
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES AVEC DIRICHLET'   2 5 12

'CLIM'    'DIRICHLET'      25.         2
'CLIM'    'DIRICHLET'      40.         5 12
```

Pour imposer une condition, on demandera toujours à l'utilisateur la liste des références sur lesquelles il faut appliquer la condition. Une liste limitée à la valeur "-1" signifie qu'il faut appliquer la valeur sur tous les objets appartenant à cette condition.

```
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES AVEC DIRICHLET'   2 5 12
'CLIM'    'DIRICHLET'      25.        2 5 12

'REFERENCES NOEUDS SOLIDES AVEC DIRICHLET'   2 5 12
'CLIM'    'DIRICHLET'      25.        -1
```

3.7 Conventions pour les unités

Toutes les grandeurs sont exprimées dans le système international.

La seule exception est la **température** qui est toujours exprimée en **degrés Celsius** (unité qui s'avère plus parlante pour les utilisateurs).
On attire l'attention de l'utilisateur qui programme des lois de variations des différentes grandeurs physiques (masse volumique,...) en fonction de la température sur le fait que Syrthes lui fournira une température en degrés Celsius. Ces lois supposant parfois une

température en Kelvin, il ne faudra pas que l'utilisateur omette d'effectuer la transformation.

On trouvera en annexe A un récapitulatif des unités utilisées dans le code.

3.8 Conventions pour la définition des angles

Lors de l'entrée des paramètres de la simulation, l'utilisateur pourra être amené à définir un certain nombre d'angles. **Tous les angles utilisés dans le fichier de données sont définis en degrés**.
Par contre, dans le cas des solides en rotation sur eux-mêmes, l'utilisateur doit fournir une vitesse de rotation : **elle est exprimée en radians/seconde** (ce choix peut apparaître un peu comme une sorte d'exception, il est motivé par la volonté de suivre des conventions habituelles).

Souvent, l'utilisateur sera amené à définir 3 angles qui représentent respectivement des rotations autour des 3 axes x, y et z. Les conventions pour leurs définitions sont présentées dans la figure 3.23.

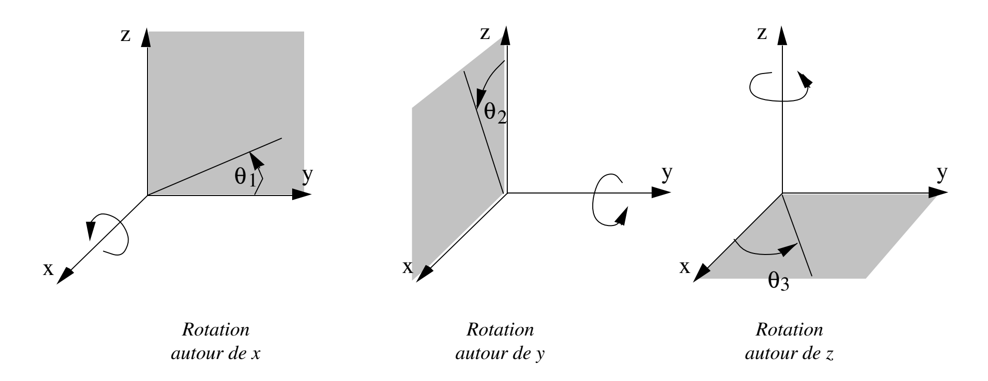


FIG. 3.23 – Convention pour la définition des angles

3.9 Renseignements informatiques sur le code SYRTHES 3.4

Cette version est écrite en FORTRAN-77 et C. Ceci assure au code une bonne portabilité.

SYRTHES a été écrit suivant des critères de développement stricts, aussi bien au niveau des déclarations (en Fortran par exemple instruction IMPLICIT NONE obligatoire), que des communs, des arguments ou des entrées sorties.

La phase de validation de SYRTHES a également été approfondie. Le choix retenu a été de comparer les résultats numériques à des expressions analytiques.

Les méthodes numériques retenues par les concepteurs sont robustes et rapides. Elles permettent d'appréhender des cas de plusieurs millions de nœuds sur station de travail. La référence [8] donne quelques éléments de statistiques sur station.

3.10 Perspectives

Les fonctionnalités apportées par SYRTHES et son couplage à des codes de thermohydraulique devraient permettre la simulation d'une classe importante de problèmes. Des extensions sont toujours possibles en fonction des demandes des utilisateurs.

Parmi les extensions envisageables, on peut citer la prise en compte du phénomène de rayonnement en milieu semi-transparent solide.
De même, il est envisagé de prendre en compte des modélisations liées aux transferts couplés air, vapeur d'eau, température qui interviennent dans le domaine du bâtiment.

On aimerait également signaler que le découplage retenu constitue également une structure intéressante pour des extensions au couplage avec un code d'électromagnétisme ou encore pour le parallèlisme.
A partir d'une version précédente de SYRTHES, un prototype [9] [10] (utilisant CALCIUM [11] et PVM [12]), a permis d'effectuer des calculs fluides et solides sur des processeurs et/ou des machines différentes ainsi que d'illustrer la possibilité de coupler de façon simultanée plusieurs codes fluides avec SYRTHES.
Cela a permis de rendre accessible la simulation de systèmes très complexes tels que les échangeurs, où plusieurs écoulements ayant des comportements très différents (fluides différents, dynamique différente,...) mais intervenant de façon simultanée, doivent être pris en compte. On a ainsi pu réaliser des couplages SYRTHES-ESTET-N3S pour la modélisation de systèmes complexes et multiphysiques [13][14][10].

Pour le couplage SYRTHES 3.4-*Code_Saturne*, le transfert des données est réalisé par "pipes" et on prévoit une version ultérieure qui s'appuyera sur MPI [15].

Enfin, soit directement dans SYRTHES soit par le biais de *syrthes2med* qui transforme les fichiers de résultats issus de SYRTHES au format MED, SYRTHES assure le chaînage avec la mécanique (notamment avec le code CODE_ASTER) pour le calcul a posteriori des contraintes d'origine thermique.

Environnement général 4

On souhaite dans ce chapitre donner une vue globale de l'architecture de SYRTHES et de sa version couplée avec un code de thermohydraulique.

Qu'il s'agisse de SYRTHES dans sa version standard ou couplée avec un code de thermohydraulique, le principe de fonctionnement du code reste inchangé.

Il semble évident que le produit global (résolution couplée de la thermique au sein du fluide et du solide) est complexe, puisqu'il nécessite aussi bien le maillage de la partie fluide que de la partie solide et l'appréhension des spécificités de chacun des deux domaines, de leurs caractéristiques physiques et des contraintes extérieures auxquelles ils sont soumis.

Cependant, comme mentionné dans ce document, une structure informatique et numérique très découplée a été retenue. Ceci se retrouve au niveau de l'ergonomie de la version puisque les éléments relatifs au code fluide et au module SYRTHES apparaissent nettement. Cela devrait faciliter grandement la compréhension du produit que pourront avoir les utilisateurs nouveaux, et également perturber de façon minimale les utilisateurs déjà formés aux codes fluides, qui voudraient utiliser les nouvelles fonctionnalités procurées par SYRTHES.

La prise en compte du rayonnement thermique se présente comme un "module" de SYRTHES. Cette approche permet de bien différencier les traitements des transferts par conduction et par rayonnement (en milieu confiné) lors de l'utilisation du code. De cette façon, le fonctionnement général du code n'a pas été alourdi. Un unique mot-clé est venu s'ajouter au fichier de données : il permet d'activer ou non la prise en compte du rayonnement thermique en milieu confiné.

Dans le cas de l'activation de la prise en compte du rayonnement, l'utilisateur doit alors fournir des données complémentaires en remplissant un fichier de données spécifique et dédié au rayonnement en milieu confiné.

Cette approche s'avère particulièrement souple lorsque l'on souhaite évaluer l'importance des transferts radiatifs dans un problème donné : un calcul où l'on se restreint à la conduction pure (ou au couplage thermique fluide/solide) est directement possible à partir du calcul "conduction+rayonnement" puisqu'il suffit de désactiver le calcul du rayonnement dans le fichier de données.

4.1 Organisation des fichiers relatifs à Syrthes

On présente ici les fichiers qui interviennent lors de la réalisation d'un calcul thermique dans un solide. La description complète de ces fichiers est réalisée aux chapitres 5, 7 et à l'annexe B.

4.1.1 Calcul de conduction thermique

Le schéma 4.2 présente l'organisation générale des fichiers de données et de résultats du code Syrthes pour des calculs de conduction.

4.1.1.a Les fichiers de données

Les fichiers nécessaires en entrée du code Syrthes sont les suivants :

- un fichier géométrique contenant le maillage non structuré du domaine solide. Ce fichier contient, entre autres, la liste des éléments, les coordonnées des nœuds, les références des nœuds, etc ... Le paragraphe 4.2.1 reprend quelques éléments relatifs aux outils utilisables pour sa génération,
- un fichier de paramètres qui contient les divers mots-clés (pour le choix des options), les paramètres de calcul, les critères numériques liés à la résolution, les conditions physiques lorsqu'elles sont constantes en temps et les conditions aux limites lorsqu'elles sont constantes en temps,
- des fichiers sources Fortran "utilisateurs", dont certains des sous-programmes sont optionnels (définition des conditions physiques et conditions aux limites variables en temps et en espace par exemple, ...)

4.1.1.b Les fichiers de résultats

Les résultats sont constitués par les fichiers suivants :

- un **fichier géométrique**, contenant la géométrie du domaine solide (destiné au post-processeur).
- un **fichier résultat** solide contenant la température à chaque nœud du maillage,
- un **fichier chronologique** similaire au précédent, mais contenant les résultats en plusieurs pas de temps définis par l'utilisateur.
- un **fichier d'historiques** en temps pour le solide, permettant de suivre l'évolution en temps d'un ensemble de points du solide. Cette option vise plus particulièrement les utilisateurs intéressés par les transitoires thermiques, et donc cherchant le réchauffement ou le refroidissement d'un ou plusieurs points particuliers.

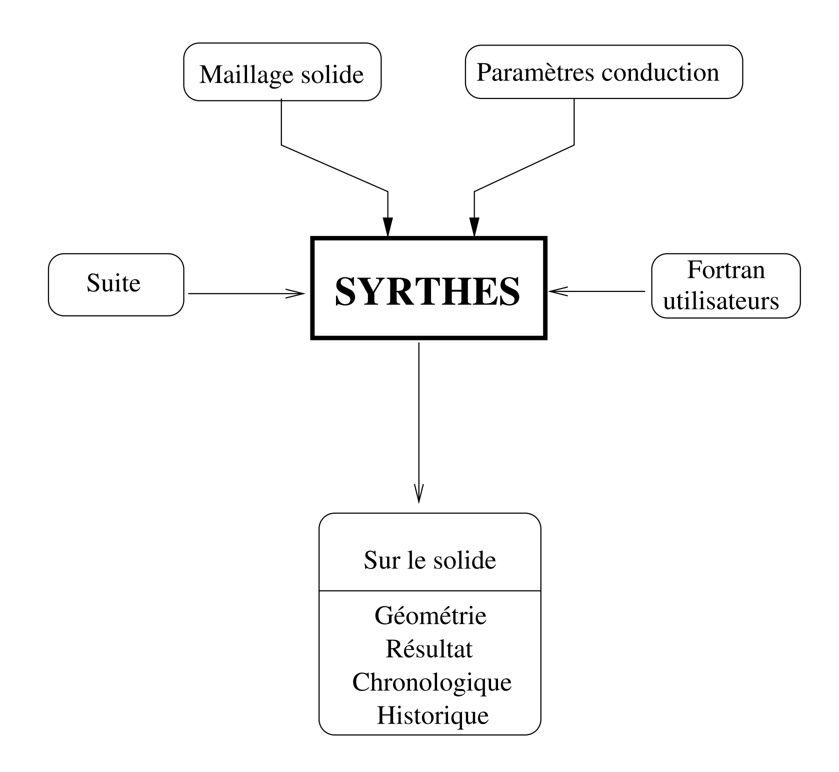


FIG. 4.1 – Schéma de fonctionnement de SYRTHES- calcul de conduction

4.1.2 Calcul de conduction + rayonnement

Les fichiers de données et de résultats déjà présentés ne sont pas modifiés mais sont complétés par un certain nombre de fichiers spécifiques au traitement du rayonnement thermique.

4.1.2.a Les fichiers de données

Les fichiers de données relatifs au traitement du rayonnement sont au nombre de 2 :

- Le maillage.
  C'est le fichier qui contient la définition du maillage pour le rayonnement.
- Le fichier de paramètres.
  Ce fichier est généralement nommé *syrthes.ray*. C'est l'homologue du traditionnel fichier *syrthes.data*. Il contient la définition de tous les paramètres utilisateurs relatifs au traitement du rayonnement.
  On rappelle ici que les seuls éléments autorisés pour le maillage de rayonnement sont les segments à 2 nœuds en dimension 2 et les triangles à 3 nœuds en dimension 3

4.1.2.b Les fichiers de résultats

La prise en compte du rayonnement thermique dans les calculs ne génère a priori pas de résultats en soi puisqu'elle se traduit par la modification du champ de température dans le solide. Ce sont donc les traditionnels fichiers de résultats de SYRTHES qui rendent compte de la prise en compte simultanée des phénomènes de conduction et de rayonnement.

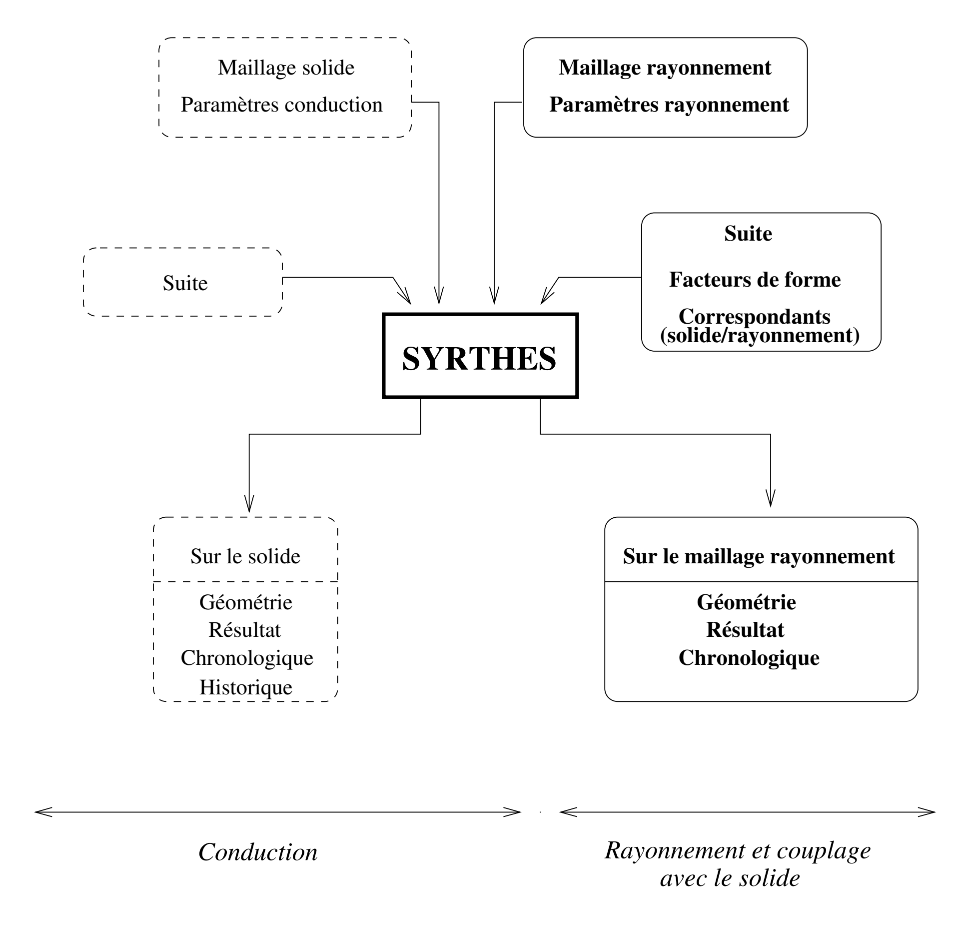


FIG. 4.2 – Organisation générale des fichiers de SYRTHES- calcul de conduction/rayonnement

Cependant, il a semblé intéressant d'avoir accès à certaines grandeurs directement liées à la prise en compte du rayonnement. Ainsi, il est possible de demander au code de générer certains résultats directement sur le maillage de rayonnement.

Comme pour le solide, on dispose de 3 fichiers :
- un fichier géométrique (qui reprend le maillage de rayonnement),
- un fichier de résultats,
- un fichier chronologique qui contient les résultats en divers pas de temps.

Les résultats sont actuellement constitués des variables suivantes :
- la température,
- le flux de rayonnement par bande.

Remarque : *en rayonnement, la discrétisation utilisée est de type P_0 ; c'est-à-dire que les grandeurs sont constantes par facette.*

4.1.2.c Les fichiers annexes

Ce sont des fichiers qui ne sont pas exploitables directement par l'utilisateur mais dans lesquels il est possible de stocker les informations les plus coûteuses à générer. Ainsi dans

la phase initiale d'un calcul il est nécessaire de calculer d'une part les grandeurs nécessaires aux interpolations qui seront faites entre les maillages de conduction et de rayonnement et d'autre part les facteurs de forme qui seront utilisés lors de la résolution.
Générer les facteurs de forme peut être relativement coûteux lorsque le nombre de facettes du maillage est important. Il faut en effet se souvenir que le nombre de facteurs de forme à calculer est $n(n-1)/2$ lorsque le nombre de facettes du maillage est n.
SYRTHES dispose d'une option de sauvegarde de ces grandeurs sur fichier, ce qui permet de s'affranchir du calcul lorsque l'on effectue des suites de calcul. On rappelle en effet que ces grandeurs sont purement géométriques et restent constantes si la géométrie n'évolue pas.
De façon similaire, il est possible de demander la sauvegarde sur fichier des données relatives aux interpolations entre les maillages de conduction et de rayonnement. Lors des suites de calculs on pourra alors s'affranchir de les recalculer.

4.1.3 Calcul SYRTHES + couplage avec un code de thermohydraulique

Dans le cas du couplage avec un code de thermohydraulique, l'organisation des fichiers de SYRTHES reste inchangée. Les fichiers du code de thermohydraulique s'ajoutent simplement à l'environnement initial de SYRTHES (figure 4.3).

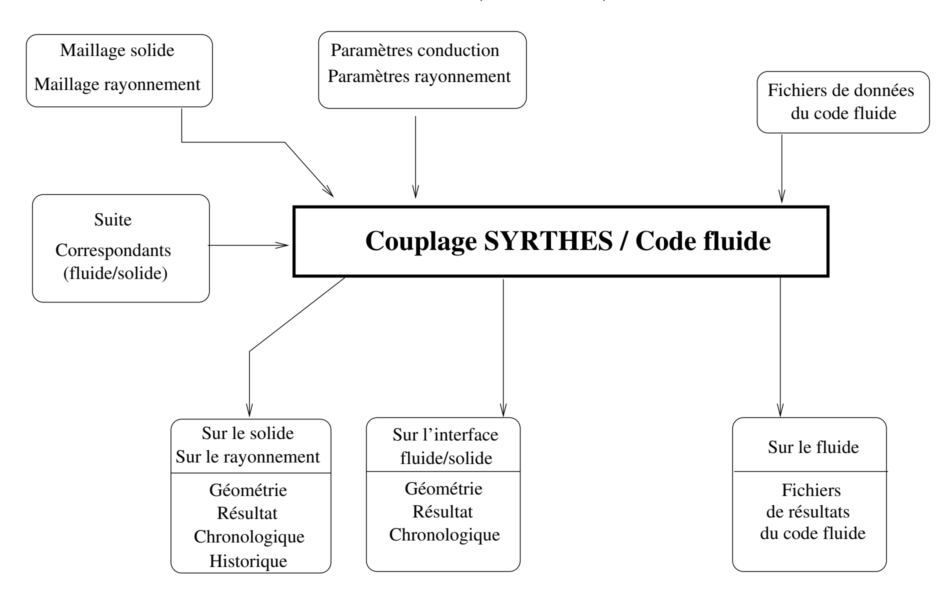


FIG. 4.3 – Organisation générale des fichiers de SYRTHES

Dans ce cas, on dispose d'une part des fichiers traditionnels de SYRTHES et d'autre part de fichiers spécifiques au couplage avec un code de thermohydraulique :

- au niveau des résultats, il est possible d'obtenir trois fichiers supplémentaires qui permettent de visualiser des résultats sur la surface du fluide en contact avec le solide. Le premier fichier contient le maillage surfacique fluide en contact avec le solide, le deuxième les résultats au dernier pas de temps calculé (température de peau et coefficient d'échange fluide) et le troisième est similaire au précédent mais comporte ces résultats à plusieurs pas de temps,

- en ce qui concerne le listing de sortie, chaque code génère ses propres affichages et on retrouve donc deux listings indépendants : un pour la partie solide et un pour la partie fluide.

Remarque :
Dans tous les cas, le fichier résultat solide peut être utilisé pour faire une suite de calcul.

4.2 Pré et post processeurs

Comme pour tout calcul industriel, le volume de données à générer et celui issu du calcul rend indispensable l'utilisation de pré- et post-processeurs performants.
Dans la mesure où le format des fichiers résultats fluide issus d'un calcul couplé est exactement identique à celui qu'aurait produit une simulation faisant intervenir le code fluide standard, les post-processeurs usuels du code fluide restent utilisables pour la visualisation des résultats sur le domaine fluide.

On s'attache davantage dans ce paragraphe à préciser les différents outils de la chaîne nécessaires ou utilisables pour la génération des données géométriques et l'analyse des résultats sur le solide.

4.2.1 SYRTHES

Préprocesseurs

Le maillage éléments finis du domaine solide peut-être réalisé avec un mailleur quelconque : il faudra simplement s'assurer de la compatibilité des structures des données issues du mailleur avec celles acceptées par le module solide.

Actuellement, le module reconnaît directement les fichiers issus des logiciels Simail (version 6.0) [16], et Ideas-MS[17]. Il est par ailleurs à noter qu'il reconnaît également les fichiers au format Syrthes. Ceci autorise la reprise de calculs même si l'on ne dispose plus que des anciens fichiers de résultats (fichier géométrie + fichier résultat).
L'utilisation de tout autre mailleur demeure possible à condition d'adapter le fichier qui en est issu à l'un des 3 formats disponibles.

Postprocesseurs

Quelle que soit l'option choisie, Syrthes fournit toujours un fichier contenant la géométrie du solide sous forme d'un maillage non structuré (table de nœuds + connectivité). Des utilitaires permettent la transformation des fichiers au format Syrthes en base de données compatibles avec divers post-processeurs. Ces utilitaires feront l'objet du paragraphe 4.2.2
On pourra entre autres, citer l'utilisation possible de post-processeurs tels que EnSight [18] ou Ideas-MS [17].

Le format des fichiers de résultats est décrit en annexe B.

4.2.2 Utilitaires disponibles pour l'interfaçage avec divers post-processeurs

On présente ici les utilitaires qui ont été développés pour l'interfaçage des fichiers résultats SYRTHES avec divers logiciels de post-traitement :

syrthes2ensight : transformation d'un fichier SYRTHES en une base de données ENSIGHT au format "case" (traitement des problèmes 2D et 3D).
Emploi : *syrthes2ensight syrthes_geom syrthes_resu fich_ensight*

- ▷ *syrthes_geom* : nom du fichier géométrie issu de SYRTHES,
- ▷ *syrthes_resu* : nom du fichier résultat issu de SYRTHES. Ce fichier peut être le fichier de résultats (ne contenant qu'un seul pas de temps) ou le fichier chronologique (dans ce cas les n pas de temps seront traités).
- ▷ *fich_ensight* : nom du fichier que l'on souhaite donner au fichier format ENSIGHT.

syrthes2med : transformation d'un fichier SYRTHES en une base de données MED [19] [20].
Emploi : *syrthes2med syrthes_geom syrthes_resu fichier_med*

- ▷ *syrthes_geom* : nom du fichier géométrie issu de SYRTHES,
- ▷ *syrthes_resu* : nom du fichier résultat issu de SYRTHES.
- ▷ *fichier_med* : nom du fichier qui contiendra le maillage et les résultats au format MED.

Les fichiers de données relatifs à SYRTHES 5

L'activation du module SYRTHES requiert au minimum un fichier de paramètres où l'utilisateur pourra définir précisément son cas et ses choix numériques, un fichier géométrique pour la description du domaine de calcul et un fichier d'environnement qui indique au module les chemins d'accès aux divers fichiers.
Dans le cas de la prise en compte du rayonnement thermique, on fournit au code un fichier de paramètres complémentaires et un maillage dédié au calcul du rayonnement.

5.1 Fichiers géométriques

5.1.1 Maillage conduction

Rappelons tout d'abord que ce fichier est obligatoire.
Ce fichier contient le maillage du domaine solide ainsi que les diverses références appliquées sur les nœuds, arêtes ou faces du maillage.

Le maillage solide est de type non structuré et les informations nécessaires à SYRTHES sont une table de coordonnées des nœuds, les références des nœuds (éventuellement des arêtes et des faces) et la connectivité du maillage.
Il est à noter que **le maillage doit impérativement comporter des nœuds milieux** (les seuls éléments reconnus par SYRTHES sont les triangles à 6 nœuds et arêtes droites en 2D et les tétraèdres à 10 nœuds et faces planes en 3D).

5.1.2 Maillage rayonnement

Dans le cas où le calcul du rayonnement thermique est activé, un second maillage doit être fourni à SYRTHES.
Il est également de type non structuré et les informations nécessaires à SYRTHES sont une table de coordonnées des nœuds, les références des faces et la connectivité du maillage.
Il s'agit d'un maillage surfacique de type P_1. Les éléments ne comportent donc pas de nœuds milieux.
Les éléments reconnus par SYRTHES pour le maillage de rayonnement sont les segments à 2 nœuds en 2D et les triangles à 3 nœuds en 3D.

5.1.3 Formats des fichiers géométriques

Dans la version standard de SYRTHES, 3 formats de fichiers géométriques sont reconnus :
- les fichiers issus du mailleur SIMAIL (version 6.0),
- les fichiers issus du mailleur IDEAS-MS,
- les fichiers au format SYRTHES issus du module lui-même.

L'identification du format du fichier est réalisée grâce à l'extension qui est donnée au nom du fichier géométrique. Ce suffixe est par conséquent figé et obligatoire :
- format SIMAIL ⟶ "**.des**" (exemple : *toto.des)*,
- format IDEAS-MS ⟶ "**.unv**" (exemple : *toto.unv)*,
- format SYRTHES ⟶ "**.syr**" (exemple : *toto.syr)*,

On pourra se reporter respectivement à [16] et [17] pour les descriptions des formats SIMAIL et IDEAS-MS, à l'annexe B pour la description du fichier géométrique SYRTHES.

5.2 Fichiers de paramètres

Ce sont les deux fichiers qui contiennent tous les paramètres utilisateur pour la réalisation d'un calcul. Le chapitre suivant leur est entièrement consacré.

5.3 Fichier d'environnement : "syrthes.env"

Il s'agit là du **seul** fichier dont le nom est **imposé**. Son autre particularité est qu'il est également le seul à devoir obligatoirement se trouver dans le même répertoire que l'exécutable du code.

Son rôle est essentiel : indiquer à SYRTHES tous les chemins d'accès ainsi que les noms de tous les fichiers qui interviendront lors de l'exécution. Ce fichier va permettre à l'utilisateur d'organiser son travail à sa guise puisque de cette façon les noms des fichiers de données comme de résultats sont laissés à son libre choix tout comme le sera leur emplacement dans l'arborescence du système.

5.4 Activation du couplage thermique fluide/solide

Dans le cas des calculs couplés fluide/solide, l'activation de SYRTHES est réalisée au niveau des paramètres du code de thermohydraulique (se reporter à la notice d'utilisation du code fluide ([2] pour *Code_Saturne*).
On signale à ce propos que pour l'utilisateur, les seules modifications, par rapport à l'utilisation standard du code fluide, consistent à activer le couplage avec SYRTHES et à définir les zones fluides couplées.
Parallèlement, pour la partie solide, l'utilisateur définira les paramètres dans les fichiers de données de SYRTHES comme dans le cas des calculs non couplés. Simplement, quelques paramètres supplémentaires apparaîtrons dans les fichiers de données.

Fichiers de paramètres 6

Notons tout d'abord que les noms de ces fichiers que nous appellerons ici "*syrthes.data*" et "*syrthes.ray*" pour des raisons de clarté, ne sont pas imposés et qu'ils sont du libre choix de l'utilisateur.
Le premier fichier (*syrthes.data*) contiendra tous les paramètres nécessaires à SYRTHES pour le calcul de la conduction et le second (*syrthes.ray*) est spécifique au calcul du rayonnement en milieu transparent.

Ces fichiers sont constitués de mots-clés dont la plupart ont des valeurs par défaut.

6.1 Le fichier de données pour la conduction : *syrthes.data*

Même si l'ordre des mots-clés peut-être quelconque, on préserve généralement celui qui est proposé par défaut afin de concerver au fichier une certaine logique.

Le fichier est composé de 3 principaux "paragraphes" :

- **les mots-clés pour le pilotage du calcul**
  On définit ici les principales options du calcul : pas de temps, options du solveur, gestion des résultats du code,etc
- **La définition des références des noeuds et faces du maillage**
  Il s'agit ici de faire le lien entre les références qui ont été mises en places sur les entités de maillage et les conditions physiques auxquelles elles correspondent.
- **La donnée des conditions aux limites et propriétés physiques**
  On définit des propriétés physiques des matériaux, des conditions initiales, des conditions aux limites,etc.

La plupart des paramètres possèdent des valeurs par défaut et en pratique l'utilisateur n'en modifiera qu'un nombre restreint.

6.2 Généralités

```
/ Definitions
/-------------
/
'TITRE POUR LE CALCUL SOLIDE=' 'CALCUL SYRTHES : test'
/
'DIMENSION DU PROBLEME=' 2
'AXE D AXISYMETRIE (AUCUN,OX,OY)=' 'AUCUN'
'SUITE DE CALCUL=' 'NON'
/
'ISOTROPIE DU MATERIAU='   1
'NOMBRE DE DIRECTIONS PERIODIQUES='   0
/
'CONDITIONS LIMITES PAR NOEUD OU PAR FACE='  'FACE'
'DEFINITION DES PROPRIETES PHYSIQUES PAR=' 'ELEMENT'
'DEFINITION DES FLUX VOLUMIQUES PAR=' 'ELEMENT'
```

6.2.1 Titre

Mot-clé : TITRE POUR LE CALCUL SOLIDE

Il est ici possible de donner un titre à son étude.

6.2.2 Dimension du problème

Mot-clé : DIMENSION DU PROBLEME

Ce mot-clé possède 2 valeurs possibles :

2 : calcul en dimension 2,

3 : calcul en dimension 3.

6.2.3 Axe d'axisymétrie

Mot-clé : AXE D AXISYMETRIE

'AUCUN' : Le calcul est réalisé en cartésien,

'OX' : calcul axisymétrique ayant Ox pour axe d'axisymétrie,

'OY' : calcul axisymétrique ayant Oy pour axe d'axisymétrie.

Mot-clé : SUITE DE CALCUL

Ce mot-clé indique au code s'il s'agit d'un premier calcul ou si le calcul repart d'une solution déjà calculée (suite d'un précédent calcul).

'OUI' : c'est une suite de calcul (il faudra fournir le fichier résultat à partir duquel on effectuera la suite de calcul),

'NON' : ce n'est pas une suite de calcul.

Mot-clé : ISOTROPIE DU MATERIAU

Ce mot-clé est de type entier et peut prendre pour valeur :

1 : les matériaux composant le solide sont isotropes : la conductivité thermique sera donc définie par un scalaire (éventuellement variable en temps et en espace) en chaque point du domaine,

2 : les matériaux composant le solide sont orthotropes : la conductivité thermique sera donc définie par une matrice diagonale (dont les termes sont éventuellement variables en temps et en espace) en chaque point du domaine (il est à noter que les zones isotropes pourront être définies en indiquant des coefficients égaux pour la matrice),

3 : les matériaux composant le solide sont anisotropes : la conductivité thermique sera donc définie par une matrice symétrique 3×3 en dimension 3 ou 2×2 en dimension 2 (dont les termes sont éventuellement variables en temps et en espace) en chaque point du domaine (il est à noter que des zones isotropes ou orthotropes pourront être définies en indiquant des coefficients égaux pour la matrice),

Mot-clé : NOMBRE DE DIRECTIONS PERIODIQUES

Il est possible de définir jusqu'à 2 périodicités en dimension 2 et jusqu'à 3 en dimension 3. Si le mot-clé vaut 0, il n'y a pas de périodicité dans le domaine.

6.2.4 Conditions aux limites et propriétés physiques

Mot-clé : CONDITIONS LIMITES PAR NOEUD OU PAR FACE

Ce mot-clé indique au code s'il doit prendre en compte les références des nœuds ou des faces des éléments du maillage solide pour l'application des conditions aux limites

'FACE' : dans ce cas, les conditions aux limites (sauf bien sûr Dirichlet) sont imposées sur les **faces** du maillage. Cette option autorise en particulier le traitement des conditions aux limites discontinues : un nœud peut être soumis à des conditions différentes suivant la face de laquelle il est vu.

'NOEUD' : dans ce cas, les conditions aux limites sont imposées sur les **nœuds** du maillage. Cette option reste intéressante dans le cas des maillages qui ne disposent pas nativement de références sur les faces. La mise en place de ces dernières par le biais d'un sous-programme utilisateur pouvant s'avérer délicate en dimension 3, l'utilisateur pourra utiliser cette option qui conserve une bonne représentativité des conditions aux limites dans la plupart des cas. (cf exemple 3.5)

On notera que la condition de couplage (avec une zone fluide ou avec le rayonnement) est une condition à la limite du point de vue solide et qu'elle sera par conséquent également gérée par le choix qui est fait ici. **Il est fortement recommander d'utiliser la définition par FACE pour les conditions aux limites.**

Mot-clé : DÉFINITION DES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES PAR

Suivant le mailleur employé et le type de problème traité les propriétés physiques des matériaux (masse volumique, chaleur spécifique et conductivité thermique) peuvent être appliquées par :

'NOEUD' : dans ce cas, les conditions aux physiques sont imposées sur les **nœuds** du maillage. Cette option reste intéressante dans le cas où les éléments n'ont pas été référencés mais il convient de remarquer que ce n'est pas une démarche "naturelle" puisque par nature, les propriétés physiques ont une nature "volumique". Par ailleurs, cette démarche ne permet pas de prendre en compte la discontinuité du comportement de 2 matériaux différents positionnés côte-à-côte (ambiguité des nœuds d'interface).

'ELEMENT' : dans ce cas, les conditions physiques sont directement appliquées sur les éléments. C'est l'option la plus commune.

'NOEUD PAR ELEMENT' : dans le cas de comportements physiques plus raides, il peut être nécessaire d'avoir une variation des propriétés au sein d'un même élément. Cette option permet de définir les propriétés par élément (loi de variation par exemple) mais elles seront recalculées en fonction des conditions spécifiques présentes en chacun des nœuds de l'élément.On conserve par ailleurs la discontinuité des propriétés de 2 matériaux différents positionnés côte-à-côte.

Mot-clé : DÉFINITION DES FLUX VOLUMIQUES PAR

Le fonctionnement de ce mot-clé est identique au mot-clé précédent (définition des propriétés physiques par).

6.3 Gestion du calcul

```
/ Pas de temps
/---------------
'PAS DE TEMPS SOLIDE='   100.
/'PAS DE TEMPS AUTOMATIQUE='  variation_temper(C) dt_max(s)
/'PAS DE TEMPS AUTOMATIQUE='  0.1 1000.
/'PAS DE TEMPS MULTIPLES='   iteration_max   pas_de_temps
/'PAS DE TEMPS MULTIPLES='   100 1.
/'PAS DE TEMPS MULTIPLES='   200 10.
'NOMBRE DE PAS DE TEMPS SOLIDES=' 3
```

6.3.1 Le pas de temps

Mot-clé : PAS DE TEMPS SOLIDE

Si le pas de temps est constant, on fournit ici sa valeur en secondes.

Mot-clé : PAS DE TEMPS AUTOMATIQUE

le pas de temps est recalculé automatiquement par le code à chaque itération. L'utilisateur fournit une valeur de variation maximale de la température entre deux pas de temps

consécutifs et le code calcule le pas de temps de façon à respecter cette variation maximale. L'utilisateur fournit également une valeur maximale du pas de temps qui ne pourra être franchie.

Mot-clé : PAS DE TEMPS MULTIPLES

L'utilisateur fixe plusieurs pas de temps au cours du calcul. Le pas de temps est constant par blocs de n itérations. Pour chaque bloc, on fournit la valeur du numero d'itération (en absolu) maximum du bloc et la valeur du pas de temps (en secondes) à appliquer sur ce bloc.

Mot-clé : NOMBRE DE PAS DE TEMPS SOLIDES

Ce mot-clé définit le nombre de pas de temps pour la simulation qui va être faite. Il est à noter que le nombre de pas de temps est toujours indiqué en absolu. Si l'on a réalisé 10 pas de temps lors d'un premier calcul, et que l'on souhaite en effectuer 10 autres lors d'une suite de calcul, la valeur à indiquer sera 20.

6.4 Gestion des correspondances

Ce paragraphe n'est à renseigner que dans le cas des calculs couplés fluide/solide.

```
/ Gestion des correspondants
/---------------------------
'STOCKAGE DES CORRESPONDANTS SUR FICHIER=' 'OUI'
'LECTURE DES CORRESPONDANTS SUR FICHIER='  'NON'
```

La recherche des correspondants entre les domaines fluide et solide (qui permettront la communication entre les deux domaines) peut s'avérer relativement coûteuse en temps CPU et cela d'autant plus que le nombre de nœuds constituant l'interface est important. Bien que cette phase ne soit réalisée qu'une seule fois au cours des initialisations, il peut être intéressant de s'en affranchir lors des suites de calcul. Cette délicate recherche sera alors réalisée uniquement au cours du premier lancement de calcul, et les correspondants pourront être stockés sur fichier. Lors des suites de calcul, les correspondants seront alors simplement relus dans ce fichier.

Mot-clé : STOCKAGE DES CORRESPONDANTS SUR FICHIER

- **oui** : les correspondants sont stokés sur fichier
- **non** : les correspondants ne sont pas stokés sur fichier

Mot-clé : LECTURE DES CORRESPONDANTS SUR FICHIER

- **oui** : les correspondants sont simplement relus sur fichier un usage ultérieur
- **non** : les correspondants sont calculés

Remarque 1 : *les correspondants ne peuvent être lus et stockés en même temps, en revanche, ils peuvent être ni lus ni stockés.*

Remarque 2 : *le fichier généré n'est conçu pour aucune autre exploitation que sa relecture lors d'une suite de calcul : toute modification manuelle de l'utilisateur doit être proscrite ; elle induirait inévitablement des dysfonctionnements lors du calcul suivant. De même, si un quelconque changement intervient au niveau des maillages fluide comme solide, il est impératif de bannir cette option : les correspondants doivent alors être recalculés. Les informations contenues dans le fichier sont sous forme* ASCII.

6.5 Gestion des sorties

```
/ Sorties
/--------
'NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE SOLIDE=' 2
'ECRITURE MAILLAGE SOLIDE='     'OUI'
'PAS DES SORTIES CHRONO SOLIDE='    -1
/
'HISTORIQUES CONDUCTION='            'NON'
'CHAMP DE TEMPERATURES MAXIMALES='   'NON'
/
'ECRITURE MAILLAGE PEAU FLUIDE='     'NON'
'ECRITURE RESULTATS PEAU FLUIDE='    'NON'
'ECRITURE CHRONO PEAU FLUIDE='       'NON'
```

Mot-clé : NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE SOLIDE

Ce mot-clé permet à l'utilisateur de gérer le niveau des affichages dans le fichier listing, et ce, de façon totalement découplée du niveau de précision requis sur le fluide. Ceci peut s'avérer particulièrement souple lors d'une phase de dépouillement si les résultats sur l'un ou l'autre domaine ne donnent pas satisfaction.

Ce niveau d'affichage ne concerne que les impressions des informations relatives au calcul solide. Il peut prendre pour valeur :

0 : aucune impression,

1 : impressions minimales dans la phase d'initialisation, impression à chaque pas de temps du niveau de convergence de l'algorithme de résolution,

1 : impressions normales dans la phase d'initialisation, impression à chaque pas de temps des itérations du solveur solide,

3 : impressions détaillées dans la phase initiale, impressions équivalentes au niveau 2 dans la phase de résolution.

Mot-clé : ECRITURE MAILLAGE SOLIDE

Mot-clé permet la gestion de l'écriture ou non du fichier de maillage résultat. Cette option peut être intéressante lors des suites de calculs si le maillage est très gros. Lors calcul initial, le fichier géométrie résultat a été généré et il est ensuite possible de gagner du temps en ne l'écrivant plus. Attention, toutefois, il est indispensable de générer au moins

une fois ce fichier pour pouvoir introduire les résultats de calcul dans le post-processeur (par exemple EnSight).

oui : écriture du fichier géométrie résultat,

non : pas d'écriture.

Mot-clé : PAS DES SORTIES CHRONO

Mot-clé permet la gestion des écritures des résultats dans le fichier "chronologique". Il est donc possible de stocker l'intégralité des résultats (valeur de la température en chaque nœud) sur fichier à divers instants du calcul. Il est à noter que cette fonctionnalité est à utiliser avec modération dans le cas des gros maillages car des écritures trop fréquentes conduisent rapidement à des fichiers de taille considérable !

-1 : pas de génération du fichier chronologique

n : sauvegarde des résultats tous les n pas de temps. L'utilisateur doit alors donner la valeur de n (entier positif)

6.5.1 Historique solide

Dans le cas des maillages importants, il est parfois difficile (pour des raisons d'espace disque) de sauvegarder de nombreux pas de temps successifs. Il est par conséquent particulièrement intéressant de pouvoir suivre l'évolution de la température en un nombre limité de nœuds : ceci peut permettre d'une part d'observer les variations de température en des points stratégiques du domaine et d'autre part de faciliter l'appréciation de la convergence des calculs.
Mot-clé : HISTORIQUE SOLIDE

oui : écriture du fichier historique

non : pas d'écriture

Si des historiques sont demandés, il faudra fournir plus loin la liste des nœuds concernés. et la fréquence des écritures.

6.5.2 Champ de temperatures maximales

Au cours d'un calcul, on peut être amené à vouloir connaître la température maximale atteinte en chaque nœud du maillage. Le champ obtenu ici n'est donc pas physiqque mais représentatif de la température maximale qui à été atteinte au cours du transitoire pour chacun des nœuds.
Mot-clé : CHAMP DE TEMPERATURES MAXIMALES

oui : calcul et écriture du champ de temperatures maximales,

non : pas de calcul.

6.5.3 Gestion des sorties des résultats sur la peau du fluide

Dans certains problèmes couplés fluide/solide, il peut être intéressant de connaître certaines grandeurs à l'interface. Les paramètres accessibles sont la température du fluide en proche paroi ainsi que le coefficient d'échange au niveau du fluide.
Ces résultats sont disponibles sous la même forme que les résultats sur le domaine solide. Ils se présentent ainsi sous forme de trois fichiers :
- un fichier de description du maillage de peau du fluide,
- un fichier de résultats au dernier pas de temps calculé,
- un fichier de résultats chronologiques.

Pour ne pas alourdir la structure du code, la fréquence de sortie de ce fichier chronologique sera identique à celle de l'écriture du fichier chronologique solide (cf. paragraphe précédent). Il faudra par conséquent définir des sorties chronologiques sur le solide avant de définir celles sur la peau du fluide.
Ces écritures sont donc simplement gérées à l'aide de trois mots-clés qu'il s'agit d'activer ou non.

Mot-clé : ECRITURE MAILLAGE PEAU FLUIDE

Mot-clé : ECRITURE RESULTATS PEAU FLUIDE

Mot-clé : ECRITURE CHRONO PEAU FLUIDE

6.6 Choix numériques

```
/ Choix numeriques
/-----------------
'NOMBRE ITERATIONS SOLVEUR SOLIDE='   100
'PRECISION POUR LE SOLVEUR SOLIDE=' 1.E-6
```

L'équation de la thermique dans le solide est résolue grâce à une méthode itérative de type gradient conjugué préconditionné.
La précision de la résolution peut-être réglée par l'utilisateur. Deux mots-clés, prévus à cet effet, permettent à l'utilisateur de trouver un juste compromis entre la précision souhaitée et le temps calcul nécessaire à la résolution.

Mot-clé : NOMBRE ITERATIONS SOLVEUR SOLIDE

Mot-clé : PRECISION POUR SOLVEUR SOLIDE (convergence relative)

Il est nécessaire ici de préciser un point technique : le test d'arrêt de la méthode itérative employée est basé sur 3 critères :
- le nombre d'itérations maximum donné,
- un critère de convergence absolue,
- un critère de convergence relative.

L'algorithme s'arrête donc soit
- lorsque le nombre d'itérations maximum est atteint,
- lorsque les deux critères de convergence sont respectés.

De cette façon l'utilisateur peut complètement piloter le solveur :
- demander une très grande précision : en imposant un critère de convergence relative très sévère et un nombre d'itérations suffisamment important,
- demander une précision plus modeste et/ou limiter le nombre des itérations.

Enfin, précisons le mode de calcul des critères de convergence absolue et relative. Si on a résoudre le système $Ax = b$ alors les critères s'expriment ainsi :

$$\textit{critère absolu} \qquad \|Ax - b\| < \varepsilon_1$$

$$\textit{critère relatif} \qquad \frac{\|Ax - b\|}{\|x_n\|} < \varepsilon_2$$

où ε_1 est fixé (actuellement $\varepsilon_1 = 10^{-4}$), ε_2 donné par l'utilisateur et où x_n est le résultat de la résolution au pas de temps précédent.

6.7 Définitions des références

```
/ Choix numeriques
/-----------------
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES COUPLE(E)S' 0
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES AVEC DIRICHLET'   0
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC FLUX' 0
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC COEFFICIENT D ECHANGE' 0
'REFERENCES NOEUDS OU ELEMENTS SOLIDES AVEC FLUX VOLUMIQUES' 0
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC RESISTANCE DE CONTACT' 0
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES PERIODIQUES' 0
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC RAYONNEMENT INFINI'  0
```

Il s'agit ici d'indiquer au code la correspondance entre les références qui ont été imposées sur les conditions aux limites que l'on souhaite imposer.
Pour chacune des rubriques, on indiquera la liste des références qui correspondent à la condition. Une liste réduite à "0" signifie qu'il n'y a aucune entité de maillage qui porte la condition correspondante. Remarque : *le fait que l'on considère des références de nœuds ou de faces ets géré par le mot-clé uv prédédemment* CONDITIONS LIMITES PAR NOEUD OU PAR FACE. Exemple :

```
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES AVEC DIRICHLET'   1 23  5  3
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC FLUX' 12  4  6   10
```

6.8 Conditions initiales

```
/ -------------------------------
/ Entree des conditions initiales
/ -------------------------------
/ mot-cle       valeur       liste des references
'CINI'           25.               1 4  2 12
'CINI'           30.               5 7
```

La valeur par défaut est une température initiale uniforme de 20°C.

- *valeur* : valeur de la température initiale en degrés Celsius,
- *liste des références* : liste des références des nœuds soumis à cette condition (la valeur -1 signifie qu'il s'agit de **tous** les nœuds solides).

6.9 Conditions aux limites

```
/ ----------------------------------------------------
/ Entree des conditions aux limites constantes par bloc
/ ----------------------------------------------------
/ mot-cle  type          valeur      liste des references
/
/'CLIM'    'FLUX'          flux.              1
/'CLIM'    'DIRICHLET'     T                  2
/'CLIM'    'COEF ECH'      Text   h           3
/'CLIM'    'COEF ECH'        20 6.3        2
/'CLIM'    'RES CONTACT'    g                 4
/'CLIM'    'PERIODICITE' 'T' vx vy vz      1 3 -1 4 5
/'CLIM'    'PERIODICITE' 'R' vx vy vz a1 a2 a3 b1 b2 b3 1 2 -1 3 4
/'CLIM'    'RAYT INFINI'    T  emiss          5
/'CLIM'    'RAYT INFINI'    20.   1.       2
```

Les conditions aux limites possibles sont les suivantes :

FLUX : condition de type flux imposé. Flux en W/m^2 (valeur par défaut : 0 W/m^2)

DIRICHLET : condition de type Dirichlet. Température en °C. (valeur par défaut : 20°C),

COEF ECH : condition de type coefficient d'échange. Coefficient d'échange en W/m^2K et température extérieure en °C. (valeur par défaut : T=20°C, h=0 W/m^2K)

RES CONTACT : résistance de contact. Résistance en W/m^2K. (valeur par défaut : 0 W/m^2K, c'est-à-dire coupure totale)

PERIODICITE : de translation ou de rotation. La définition de périodicités est explicitée en détail ci-dessous.

RAYT INFINI : rayonnement infini.On fournit la température à l'infini (degrés C) et l'émissivité de la paroi.

Remarque : *pour tous ces mot-clés, une liste des références réduite à* -1 *signifie qu'il s'agit de* **tous** *les nœuds ou faces soumis à cette condition.*

Remarque : *tout bord pour lequel aucune condition à la limite n'aura été spécifiée se verra automatiquement attribuer une condition de flux nul.*

Définition des périodicités

On pourra se reporter au paragraphe 3.1.5 pour les détails concernant le traitement de la périodicité. Il est possible de définir des périodicités de

- **translation**
  Dans ce cas, l'utilisateur fournit le vecteur translation (V_x, V_y, V_z) qui permet de passer de la frontière 1 à la frontière 2 ; puis la liste des références de la frontière 1, suivie de "-1", suivie de la liste des références de la frontière 2. On notera, que l'utilisateur peut nommer l'une ou l'autre des frontières périodiques "frontière 1" ou "frontière 2". La dénomination n'est pas imposée, par contre, la définition du vecteur translation doit être cohérente avec le choix qui a été fait. Ainsi, dans l'exemple ci-dessous, c'est la frontière de droite que l'on choisit d'appeler "frontière 1", le vecteur translation sera en conséquence négatif. C'est lors de la définition de la liste des références que l'utilisateur définit implicitement les nœuds appartenant à la frontière 1 et les nœuds appartenant à la frontière 2.

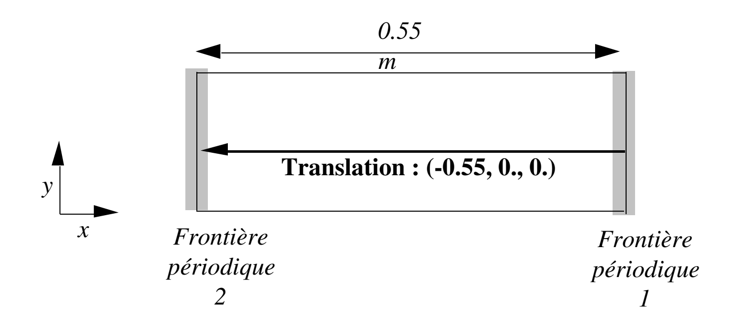


FIG. 6.1 – Définition du vecteur translation

- **rotation**
  Dans ce cas l'utilisateur fournit :
  - le vecteur translation qui décrit la translation du repère origine vers le repère local,
  - les 3 angles de rotation exprimés en degrés (respectivement autour de x, y et z) qui permettent de transformer l'orientation du repère origine en repère local,
  - les 3 angles (exprimés en degrés) décrivant la rotation propre du solide (respectivement autour de x, y et z),
  - les références qui décrivent la frontière 1, puis "-1" puis les références des nœuds qui décrivent la frontière 2.

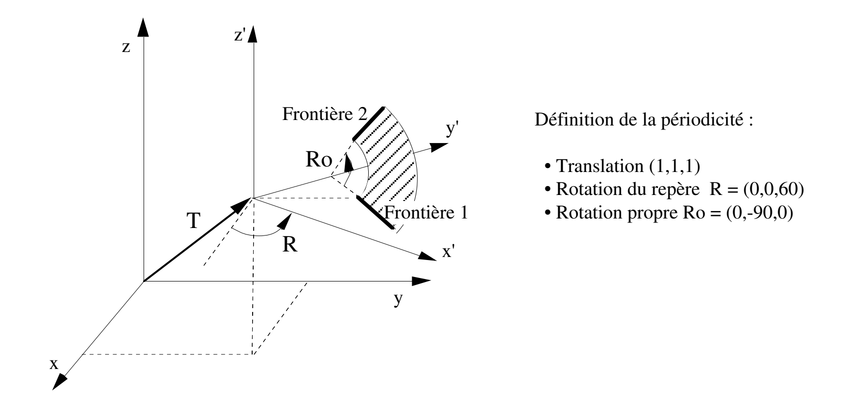


FIG. 6.2 – Définition d'une rotation

En résumé, il ne faut jamis oublier que la transformation géométrique qui est définie doit décrire la transformation qui permet de passer du 1er groupe de références vers le second.

6.10 Flux volumiques

```
/'CVOL'       valeur     references
'CVOL'      1200         13  17
```

La valeur par défaut est un flux volumique nul.
- *valeur* : valeur du flux volumique en W/m^3

- *liste des références* : liste des références des nœuds ou éléments soumis à ce flux. La valeur -1 signifie qu'il s'agit de **toutes** les entités portant un flux volumique (se reporter à la liste des références déclarée précédemment (6.7)).

La condition de flux volumique s'applique sur des nœuds ou des faces en fonction du mot-clé DÉFINITION DES FLUX VOLUMIQUES PAR (cf 6.2.4). Remarque : *une liste des références réduite à* -1 *signifie qu'il s'agit de* **tous** *les nœuds ou éléments soumis à un flux volumique.*

6.11 Propriétés physiques

```
/ mot-cle   type           valeur       liste des references
 'CPHY'     'RHO'           7700.       -1
 'CPHY'     'CP'           460.         -1
 'CPHY'     'K ISOTROPE'    25.        -1
/
/ 'CPHY'  'K ORTHOTROPE'      k11 k22 k33              ref
/ 'CPHY'  'K ANISOTROPE'      k11 k22 k33  a1 a2 a3    ref
```

Le code doit nécessairement disposer des grandeurs :
- ρ : masse volumique (valeur par défaut 7700 kg/m^3),
- k : conductivité thermique (valeur par défaut 25.1 W/mK),
- C_p : chaleur spécifique (valeur par défaut 460 $J/kg\,K$).

En fonction des caractéristiques des solides, on fournit les valeurs suivantes :
- solides isotropes
  - ▷ masse volumique (kg/m^3) : 'CPHY' 'RHO'
  - ▷ conductivité thermique (W/mK) : 'CPHY' 'CP'
  - ▷ chaleur spécifique ($J/kg\,K$) : 'CPHY' 'K ISOTROPE'
- solides orthotropes
  - ▷ masse volumique (kg/m^3) : 'CPHY' 'RHO'
  - ▷ chaleur spécifique ($J/kg\,K$) : 'CPHY' 'CP'
  - ▷ conductivité thermique (W/mK) : 'CPHY' 'K ORTHOTROPE'
    Il faut donner 3 valeurs : la conductivité suivant les direction x, y et z (0 en z si on est en dimension 2)
- solides anisotropes
  - ▷ masse volumique (kg/m^3) : 'CPHY' 'RHO'
  - ▷ chaleur spécifique ($J/kg\,K$) : 'CPHY' 'CP'
  - ▷ conductivité thermique (W/mK) 'CPHY' 'K ANISOTROPE' Il faut donner 6 grandeurs : tout d'abord les conductivités suivant les axes x, y et z du repère local du solide (ceci revient à définir les conductivités dans le repère propre), puis les 3 angles (en degrés) qui correspondent respectivement aux rotations autour des axes x, y et z et qui décrivent la rotation **du repère de référence vers le repère local du solide**.
    Remarque : *en dimension " seuls les conductivités en x et y et l'angle autour de z seront non nuls*

La figure 6.3 présente un exemple de définition d'une conductivité anisotrope dans le cas d'un disque. Les ellipsoïdes indiquent le type de propagation de chaleur en fonction de la définition de la conductivité. Dans les deux cas, la conductivité est de 25 W/mK dans la première direction propre et de 5 W/mK dans la seconde.
Si le repère propre est aligné avec le repère de référence dans le premier cas, on a au contraire indiqué un angle de 45° autour de z dans le second cas.

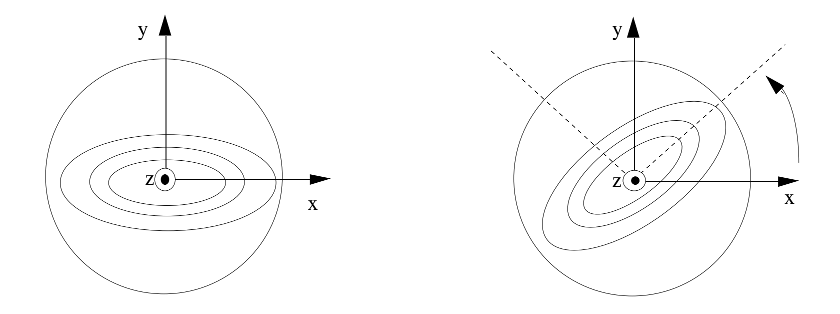


Fig. 6.3 – Conductivité anisotrope

```
/ 'CPHY'  'K ANISOTROPE'      k11 k22 k33  a1 a2 a3    ref
'CPHY'  'K ANISOTROPE'          25. 5. 0.   0. 0. 0.    1
'CPHY'  'K ANISOTROPE'          25. 5. 0.   0. 0. 45.   2
```

6.11.1 Historiques

```
'HIST' 'FREQ' 100.
'HIST' 'NOEUDS' 1 34 143 4
'HIST' 'NOEUDS'  156 2203  12220
```

Mot-clé : 'HIST' 'FREQ' Il 'agit ici de fournir la fréquence d'écriture des historiques. C'est une valeur en secondes.

Mot-clé : 'HIST' 'NOEUDS'
Ce mot-clé permet de fournir la liste des nœuds sur lesquels on souhaite disposer des historiques. Ce mot-clé peut, au besoin, être invoqué un grand nombre de fois si la liste des noœuds s'avère longue.

6.11.2 Bilans de flux

```
'BILAN FLUX SURFACIQUES'  12 3
'BILAN FLUX VOLUMIQUES'  2 4
```

Mot-clé : BILAN FLUX SURFACIQUES Mot-clé : BILAN FLUX VOLUMIQUES

Syrthes permet de réaliser des bilans de flux, soit sur les facettes de bord (bilan de flux surfaciques) soit sur des éléments volumiques (bilan flux volumiques).
Dans les deux cas, l'utilisateur fournit une liste de références et Syrthes fournira en retour les flux sur l'ensemble des facettes ou éléments concernées par ces références. Ces mots-clés peuvent apparaître plusieurs fois dans le fichier, ce qui permet de réaliser des bilans par portions de frontière ou de domaine.

Attention : cette fonctionnalité n'est accessible que lorsque les conditions aux limites sont imposées sur les faces des éléments.

Dans le fichier lisitng, Syrthes pourra fournir :

- le “flux de condition à la limite” : c’est le flux engendré par une condition de type flux ou échange,
- le flux convectif : dans le cas où la facette est couplée à un domaine fluide,
- le flux radiatif : dans le cas où la facette est couplée à du rayonnement.

Les résultats sont fournis en W.

En ce qui concerne les flux volumiques, il s’agit de faire un bilan de l’énergie apportée par le biais des flux volumiques (cf mot-clé précédent (**??**). Le résultat est fourni en W.

6.12 Le fichier de données pour le rayonnement : *syrthes.ray*

Le fichier est composé de 3 principaux “paragraphes” :

- **les mots-clés pour le pilotage du rayonnement**
  On définit ici les principales options du calcul : périodicité, facteurs de forme, bandes spectrales,...
- **La définition des références des faces du maillage**
  Il s’agit ici de faire le lien entre les références qui ont été mises en places sur les entités de maillage et les conditions physiques auxquelles elles correspondent.
- **La donnée des conditions physiques, conditions aux limites,...**
  On définit les propriétés physiques des matériaux, les conditions aux limites,etc.

La plupart des paramètres possèdent des valeurs par défaut et en pratique l’utilisateur n’en modifiera qu’un nombre restreint.

6.13 Rayonnement, données générales

6.13.1 Définitions

```
/ Definitions
/ -----------
'PERIODICITE DE ROTATION POUR LE RAYONNEMENT='  'NON'
'NOMBRE DE PLANS DE SYMETRIE POUR LE RAYONNEMENT=' 0
/
'NOMBRE DE BANDES SPECTRALES POUR LE RAYONNEMENT=' 1
```

Mot-clé : PERIODICITE DE ROTATION POUR LE RAYONNEMENT

Compte tenu de la contrainte de domaine fermé, il n’est possible de ne prendre en compte que les périodicités de rotation au niveau du rayonnement.

oui : il y a un périodicité de rotation,

non : le domaine ne présente aucune péiodicité

Attention : pour que la prise en compte de la périodicité soit possible, il faut que le nombre et la disposition des nœuds soient identiques sur chacune des frontières périodiques.

Mot-clé : NOMBRE DE PLANS DE SYMETRIE POUR LE RAYONNEMENT

Lorsque la géométrie présente des symétries, il est possible de ne faire le calcul que sur une portion du domaine (1/2, 1/4 ou même 1/8 en dimension 3). Il s’agit alors d’indiquer le nombre de symétries que présente la géométrie maillée.

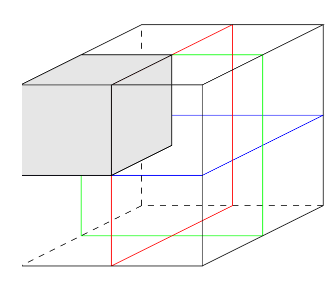


Fig. 6.4 – Exemple de symétrie en dimension 3

Attention : la prise en compte des symétries n'est pas possible si elles ne conduisent pas un domaine global fermé.
Un exemple est donné ci-dessous. Typiquement ce type de configuration traduit un domaine infiniment long et donc ouvert aux deux bouts. Cette situation n'est pas modélisable dans SYRTHES.

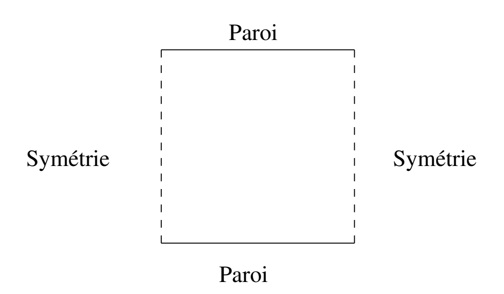


FIG. 6.5 – Exemple de symétries non autorisées

Le nombre de plans de symétrie peut prendre les valeurs 0 à 2 en dimension 2 et 0 à 3 en dimension 3.
La valeur par défaut est 0.

Mot-clé : NOMBRE DE BANDES SPECTRALES POUR LE RAYONNEMENT
Il est possible de prendre en compte l'aspect spectral du rayonnement thermique. Les corps sont alors considérés gris par bande. On fournira ensuite l'émissivité pour chacune des bandes spectrales. Le nombre de bandes spectrales est actuellement limité à 100 (ce qui est déjà considérable).

6.13.2 Définitions des sorties du code

```
/ Sorties
/ -------
'NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE RAYONNEMENT=' 2
'PAS DES SORTIES CHRONO RAYONNEMENT='  -1
'HISTORIQUES RAYONNEMENT='NON'
```

Mot-clé : NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE RAYONNEMENT

Importance des affichages dans le fichier listing pour la partie traitant du rayonnement uniquement. On rappelle que les affichages de SYRTHES pour les parties conduction et rayonnement sont faits dans le même listing.
Les valeurs possibles sont
- 0 : aucune impression
- 1 : impressions minimales
- 2 : impressions normales
- 3 : impressions détaillées

Dans le cas habituel, on recommande la valeur “2”.

Mot-clé : PAS DES SORTIES CHRONO RAYONNEMENT
Ce mot-clé permet de gérer la fréquence d'écriture sur fichier des résultats spécifiques au rayonnement :
- -1 : aucune sortie

- *n* tous les n pas de temps : l'utilisateur fixe alors la valeur de n.

Mot-clé : HISTORIQUES RAYONNEMENT Comme dans le cas de la conduction, il est possible de suivre précisément l'évolution de la température de certaines facettes. L'utilisateur fournira ensuite la liste des facettes concernées. La température sera fournie à chaque pas de temps.

oui : écriture du fichier d'historiques

non : pas de fichier

6.13.3 Gestion des correspondants et des facteurs de forme

```
/ Gestion des correspondants et facteurs de forme
/------------------------------------------------
'NOMBRE DE REDECOUPAGES POUR CALCUL DES FACTEURS DE FORME=' 0
'DOMAINE DE RAYONNEMENT CONFINE OUVERT SUR L EXTERIEUR=' 'NON'

'STOCKAGE DES FACTEURS DE FORME SUR FICHIER=' 'OUI'
'LECTURE DES FACTEURS DE FORME SUR FICHIER='  'NON'
/
'STOCKAGE DES CORRESPONDANTS POUR RAYONNEMENT='  'OUI'
'LECTURE DES CORRESPONDANTS POUR RAYONNEMENT='  'NON'
```

Mot-clé : Nombre de redecoupages pour calcul des facteurs de forme

Dans le cas où le maillage pour le rayonnement n'est pas suffisamment raffiné, il est possible d'augmenter la précision du calcul des facteurs de forme en demandant un découpage automatique des facettes lorsqu'elles sont partiellement cachées par des obstacles.
Attention : si cette option peut s'avérer intéressante, elle est généralement très gourmande en temps calcul. Il est de toute façon toujours préférable de construire un maillage adapté au problème que l'on souhaite traiter.
Les valeurs possibles vont de 0 à 2. On recommande de conserver un nombre de redécoupage égal à 0.
Mot-clé : stockage des facteurs de forme sur fichier Mot-clé : lecture des facteurs de forme sur fichier

Dans certaines configurations, le calcul des facteurs de forme peut s'avérer coûteux en temps calcul. Syrthes permet de ne réaliser le calcul qu'une seule fois et de stocker les facteurs de forme dans un fichier. Lors des suites de calcul, se fichier pourra être relu par le code et le calcul des facteurs de forme ne sera par refait.
Pour chacun des mots-clés, Les valeurs possibles sont "OUI" ou "NON".

- calcul et écriture sur fichier
- lecture sur fichier
- calcul

Mot-clé : Gestion des correspondances pour le rayonnement

Dans certaines configurations, le calcul des correpondances entre les maillages de conduction et de rayonnement peut s'avérer coûteux en temps calcul. Syrthes permet de ne réaliser le calcul qu'une seule fois et de stocker les informations dans un fichier. Lors des suites de calcul, ce fichier pourra être relu par le code et le calcul des correspondances ne sera par refait.
Les valeurs possibles sont

- calcul et écriture sur fichier
- lecture sur fichier
- calcul

6.13.4 Définitions géométriques

6.13.4.a Définitions des volumes connexes

Ces données sont utilisées par SYRTHES pour déterminer l'orientation des surfaces du maillage de rayonnement (ie : distinguer l'intérieur de l'extérieur). Il est nécessaire de fournir autant de points qu'il y a de volumes connexes dans la géométrie maillée. Pour chaque volume, on indique les coordonnées d'un point intérieur au volume.
Même si l'on a tenté de détecter un maximum d'erreurs utilisateur, ce mot-clé doit être utilisé avec attention car un défaut d'orientation des surfaces aurait de très fâcheuses conséquences sur le calcul. On veillera en particulier à ne pas être ambigu dans la définition des différents volumes.

Exemple : On souhaite calculer le champ thermique dans une plaque (figure 6.6) en prenant en compte les transferts radiatifs à l'intérieur des trous.

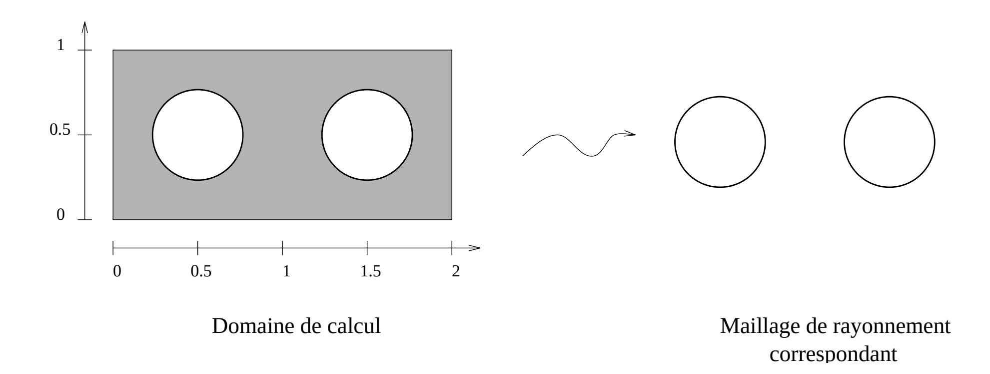


FIG. 6.6 – Exemple de domaine de calcul

Le domaine présente 2 “volumes” connexes qui pourraient être spécifiés au code de la manière suivante :

```
/ 'RAYT'   'VOLUME CONNEXE'    Px   Py   Pz
'RAYT'   'VOLUME CONNEXE'     0.5   0.5  0.
'RAYT'   'VOLUME CONNEXE'     1.5   0.5  0.
```

6.13.4.b Plans de symétrie

Définition des symétries
Pour définir les plans de symétrie du maillage de rayonnement on fournit les coefficients des équations des plans $ax + by + c = 0$ en dimension 2 et $ax + by + cz + d = 0$ en dimension 3.
Ils apparaissent autant de fois qu'il y a de symétries dans le maillage.
Même si l'on a tenté de détecter un maximum d'erreurs utilisateur, ce mot-clé doit être utilisé avec attention pour que la géométrie globale soit cohérente.

```
/'RAYT'   'SYM2D'  ax +  by +  c = 0
'RAYT'   'SYM2D'  0.    1.    0.
/
```

```
/'RAYT'   'SYM3D'  ax +  by +  cz + d = 0
/'RAYT'   'SYM3D'  0.    0.    1.  -0.5
```

6.13.4.c Périodicité

Définition de la périodicité
En dimension 2, on fournit les coordonnées P_x, P_y de l'axe de rotation et l'angle (en degrés) α entre les deux sections périodiques.
En dimension 3, on fournit les coordonnées P_x, P_y, P_z d'un point invariant, les composantes A_x, A_y, A_z de l'axe de rotation et l'angle (en degrés) α entre les deux sections périodiques.

```
/'RAYT'  'PERIO2D'   Px Py      alfa
'RAYT'  'PERIO2D'    0   0       90
/
/'RAYT'  'PERIO3D'   Px Py Pz    Ax Ay Az    alfa
/'RAYT'  'PERIO3D'   0  0  0       0  0  1     90
```

6.13.4.d Domaine de rayonnement confiné ouvert sur l'extérieur

Ce mot-clé doit être activé lorsque le calcul du rayonnement est fait dans un volume non fermé. Cette option est à utiliser avec précaution lorsque la fermeture du domaine est impossible.

```
'DOMAINE DE RAYONNEMENT CONFINE OUVERT SUR L EXTERIEUR=' 'NON'
```

6.13.5 Grandeurs physiques

6.13.5.a Bandes spectrales

Il est possible de prendre en compte l'aspect spectral du rayonnement thermique. Les corps sont alors considérés gris par bande. On fournit l'émissivité pour chacune des bandes spectrales.
Le nombre de bandes spectrales est actuellement limité à 100 (ce qui est déjà considérable).

En fonction du nombre de bandes spectrales indiquées, on fournit ensuite ensuite les limites inférieures et supérieures de chacun des bandes (m).

```
'NOMBRE DE BANDES SPECTRALES POUR LE RAYONNEMENT=' 1
/
/                               bande    lbd1     lbd2
'RAYT'  'BANDES SPECTRALES'      1     1.e-10      10.
/
/                                 bande    emissi   ref
'RAYT'  'EMISSIVITE PAR BANDE'     1      0.95     -1
/
```

6.13.5.b Emissivité

Définition des émissivités des divers matériaux en fonction de la longueur d'onde.
Pour chaque bande, on dispose du numéro de la bande et on fournit l'émissivité correspondante et la liste des références concernées par cette définition.

```
'NOMBRE DE BANDES SPECTRALES POUR LE RAYONNEMENT=' 2
/
/                             bande    lbd1     lbd2
'RAYT'  'BANDES SPECTRALES'     1     1.e-10      1.e-6
'RAYT'  'BANDES SPECTRALES'     2     1.e-6      10.
/
/                               bande    emissi   ref
'RAYT'  'EMISSIVITE PAR BANDE'    1      0.95     1 2 3
'RAYT'  'EMISSIVITE PAR BANDE'    2      0.9      1 2 3
'RAYT'  'EMISSIVITE PAR BANDE'    1      0.45     4 5
'RAYT'  'EMISSIVITE PAR BANDE'    2      0.3      4 5
/
```

6.14 Conditions limites rayonnement

La gestion des conditions aux limites est similaire à celle qui est proposée dans le cas des calculs en conduction pure. Ainsi, les différentes zones du maillages sont repérées par le biais des références (notion de couleur dans IDEAS-MS). On rappelle que sur le maillage de rayonnement, ces références sont imposées sur les facettes (notion de numéro de sous-domaine dans SIMAIL ou de couleur d'élément dans IDEAS-MS).
Les mots-clés qui suivent permettent donc à SYRTHES de repérer les différentes conditions aux limites. Il est obligatoire de les remplir soigneusement.

Cette section est destinée à fournir des conditions aux limites aux facettes du maillage de rayonnement qui ne sont pas couplées au solide.

Les conditions possibles sont

- Température imposée : la température de la facette est imposée. Elle est fournie en $°C$.
  Attention : pour des raisons de cohérence, il n'est pas envisageable de ne considérer que de telles parois dans le domaine de calcul.

  ```
  /'RAYT'  'TEMPERATURE IMPOSEE'   temp (degre C)        ref
  /'RAYT'  'TEMPERATURE IMPOSEE'     30.                   3
  ```
- Flux imposé par bande. Le flux est donné est W/m^2.
  Attention : pour des raisons de cohérence, il n'est pas envisageable de ne considérer que de telles parois dans le domaine de calcul.
  On notera que cette notion reste extrêmement délicate lorsqu'on ne considère pas un corps gris (mais gris par bande).

  ```
  /'RAYT'  'FLUX IMPOSE PAR BANDE'    bande     flux (w/m2)    ref
  'RAYT'  'FLUX IMPOSE PAR BANDE'       1     1000       -1
  'RAYT'  'FLUX IMPOSE PAR BANDE'       2     1100       -1
  ```

6.15 Entrées/Sorties Rayonnement

6.15.1 Gestion des sorties

```
'NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE RAYONNEMENT=' 2
'PAS DES SORTIES CHRONO RAYONNEMENT='  -1
```

6.15.2 Gestion des correspondants et des facteurs de forme

Mot-clé : Nombre de redecoupages pour calcul des facteurs de forme

Dans le cas où le maillage pour le rayonnement n'est pas suffisamment raffiné, il est possible d'augmenter la précision du calcul des facteurs de forme en demandant un découpage automatique des facettes lorsqu'elles sont partiellement cachées par des obstacles.
Attention : si cette option peut s'avérer intéressante, elle est généralement très gourmande en temps calcul. Il est de toute façon toujours préférable de construire un maillage adapté au problème que l'on souhaite traiter.
Les valeurs possibles vont de 0 à 2. On recommande de conserver un nombre de redécoupage égal à 0.

```
'NOMBRE DE REDECOUPAGES POUR CALCUL DES FACTEURS DE FORME=' 0
```

Mot-clé : Gestion des facteurs de forme

Dans certaines configurations, le calcul des facteurs de forme peut s'avérer coûteux en temps calcul. SYRTHES permet de ne réaliser le calcul qu'une seule fois et de stocker les facteurs de forme dans un fichier. Lors des suites de calcul, se fichier pourra être relu par le code et le calcul des facteurs de forme ne sera par refait.

```
'STOCKAGE DES FACTEURS DE FORME SUR FICHIER=' 'OUI'
'LECTURE DES FACTEURS DE FORME SUR FICHIER='  'NON'
```

Mot-clé : Gestion des correspondances pour le rayonnement

Dans certaines configurations, le calcul des correpondances entre les maillages de conduction et de rayonnement peut s'avérer coûteux en temps calcul. SYRTHES permet de ne réaliser le calcul qu'une seule fois et de stocker les informations dans un fichier. Lors des suites de calcul, ce fichier pourra être relu par le code et le calcul des correspondances ne sera par refait.

```
'STOCKAGE DES CORRESPONDANTS POUR RAYONNEMENT='  'OUI'
'LECTURE DES CORRESPONDANTS POUR RAYONNEMENT='  'NON'
```

6.16 Couplages

Le couplage des différents phénomènes (convection/conduction/rayonnement) et des maillages correspondants est réalisé par le biais des références.

6.16.1 Couplage conduction/rayonnement

Ce mot-clé n'est présent que si le calcul du rayonnement a été activé. Il permet alors de définir les zones des maillages conduction et rayonnement qui sont couplées.
L'utilisateur définit successivement les listes des références qui sont en vis-à-vis tout d'abord sur le maillage de conduction puis sur le maillage de rayonnement.

On rappelle que sur le maillage de rayonnement , il s'agit toujours de références de faces alors que sur le maillage de conduction il peut s'agir soit de nœuds soit de faces en fonction de l'option choisie pour les conditions aux limites.

```
/ References sur le solide
/ ------------------------
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC RAYONNEMENT CONFINE'  12 5 2
/
/ References sur le maillage de rayonnement
/ ----------------------------------------
'RAYONNEMENT : REFERENCES FACES COUPLEES AU SOLIDE'  4 7
```

6.16.2 Couplage fluide/conduction

Ce paragraphe n'est présent que si SYRTHES est couplé à un code de mécanique des fluides. Il permet alors de définir les zones des maillages pour le fluide et pour la conduction qui sont couplées.

L'utilisateur définit la liste des références des faces (ou nœuds) du solide (maillage de conduction) qui sont couplés au domaine fluide.

Remarque : *en ce qui concerne le fluide, les faces dont la condition à la limite est le couplage avec le solide auront été spécifiées au moment de la définition des conditions aux limites dans le code fluide. L'utilisateur pourra se reporter à la notice d'utilisation de Code_Saturne [2] pour plus de détails.*
Ce mot-clé est à renseigner dans le fichier *syrthes.data*

```
/ References sur le solide
/ ------------------------
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES COUPLE(E)S' 9 13 43
```

6.17 Fichiers pour le calcul

Il s'agit ici de renseigner le fichier *syrthes.env* qui permet à l'utilisateur d'indiquer au code le nom des fichiers de données et de résultats qui seront utilisés pour la simulation.
Dans ce fichier, les lignes qui commencent pqr une étoiles sont des lignes de commentaires.

On distingue 4 sections :
- **Emplacement des fichiers de Syrthes**
  L'utilisateur définit ici les chemins d'accès aux répertoires qui contiennent respectivement les fichiers de données, les fichiers pour les suites de calcul et le fichiers de résultats. L'utilisateur peut choisir de mettre tous les fichiers dans le même répertoire ou au contraire de structurer son étude et de séparer les divers types de fichiers.
  Le chemin d'accès des répertoires peut être fourni en relatif par rapport à la position du fichier d'environnement (*syrthes.env*) dans l'environnement de travail.

```
EMPLACEMENT DES FICHIERS POUR SYRTHES
  AMONT : ./
  SUITE : ./
  AVAL :  ./
```

- **Nom des fichiers amont pour Syrthes**
  Définition du nom des divers fichiers d'entrée du code.

```
NOM DES FICHIERS AMONT POUR SYRTHES
  DONNEES DU CALCUL : syrthes.data
  GEOMETRIE SOLIDE : maillage.des
  DONNEES POUR LE RAYONNEMENT :  syrthes.ray
  MAILLAGE RAYONNEMENT : maillray.des
```

- **Nom des fichiers suite pour Syrthes**
  Définition du nom des divers fichiers nécessaires aux suites de calcul.

```
NOM DES FICHIERS SUITE POUR SYRTHES
  SUITE SOLIDE RESU : resus1
  STOCKAGE DES CORRESPONDANTS :  corresp
  FACTEURS DE FORME RAYONNEMENT : fdf
  STOCKAGE DES CORRESPONDANTS RAYONNEMENT : corresp.ray
```

- **Nom des fichiers aval pour Syrthes**
  Définition du nom des divers fichiers résultats du code.

```
NOM DES FICHIERS AVAL POUR SYRTHES
  RESU SYRTHES 1 : geoms
  RESU SYRTHES 2 : resus1
  CHRONO SYRTHES 2 : resusc1
  HISTORIQUE SOLIDE RESULTAT : histos1
  MAILLAGE PEAU FLUIDE :  ff1
  RESULTATS PEAU FLUIDE : ff2
  CHRONO PEAU FLUIDE : ff2c
  MAILLAGE DE RAYONNEMENT : ray.geo1
  RESULTATS DE RAYONNEMENT : ray.res1
  CHRONO DE RAYONNEMENT : ray.chro1
  HISTORIQUE RAYONNEMENT : ray.histo1
```

Suivant les options choisies pour la simulation le nombre des fichiers est variable : l'utilisateur n'aura donc pas nécessairement la totalité des noms de fichier à fournir.

6.17.1 Exemple pour un calcul Syrthes en conduction

6.17.1.a Fichiers amont

- DONNEES DU CALCUL. C'est le fichier de paramètres qui est généralement nommé *syrthes.data*.
- GEOMETRIE SOLIDE : Maillage volumique décrivant le solide. On rappelle que l'extension est obligatoire et détermine le type du fichier (cf. 5.1).

6.17.1.b Fichiers suite

- SUITE SOLIDE RESU : lors d'une suite de calcul, on fournit à Syrthes le fichier résultat du calcul précédent. Le calcul se poursuivra à partir de cet état.

6.17.1.c Fichiers résultats

- RESU SYRTHES 1 : Géométrie du solide. Ce fichier sera utilisé pour le post-traitement. Il pourra également être fourni en entrée du code.

- RESU SYRTHES 2 : Sauvegarde de la température en chaque nœud du maillage.
- CHRONO SYRTHES 2 : Sauvegarde de la température en chaque nœud du maillage tous les n pas de temps. Ce fichier n'existe que si des sorties chronologiques ont été demandées.
- HISTORIQUE SOLIDE RESULTAT : Valeur de la température au niveau des capteurs à la fréquence demandée. Ce fichier n'existe que si des sorties historiques ont été demandées (cf. **??**).

6.17.2 Exemple pour un calcul Syrthes en conduction et rayonnement

Les fichiers purement relatifs à Syrthes conduction sont inchangés. Seuls les fichiers supplémentaires sont explicités ci-dessous.

6.17.2.a Fichiers amont

- DONNEES POUR LE RAYONNEMENT : C'est le fichier de paramètres spécifiques au rayonnement. Il est généralement nommé *syrthes.ray*.
- MAILLAGE RAYONNEMENT : Maillage surfacique décrivant les parois pour le calcul radiatif. On rappelle que l'extension est obligatoire et détermine le type du fichier (cf. 5.1).

6.17.2.b Fichiers suite

- FACTEURS DE FORME RAYONNEMENT : Ce fichier n'est présent que si l'utilisateur a demandé une écriture ou une relecture des facteurs de forme (cf. 6.15.2).
- STOCKAGE DES CORRESPONDANTS RAYONNEMENT : Dans le cas où l'utilisateur a demandé une sauvegarde ou une relecture des correspondants, le nom du fichier lui est demandé (cf. 6.15.2).

6.17.2.c Fichiers résultats

- MAILLAGE DE RAYONNEMENT : Géométrie des parois radiatives. Il s'agit d'un maillage surfacique (segments en 2D et triangles en 3D). Ce maillage pourra être utilisé pour le post-traitement des résultats spécifiques au rayonnement.
- RESULTATS DE RAYONNEMENT : Fichier qui contient les grandeurs spécifiques au rayonnement (flux radiatifs,...). On pourra se reporter au paragraphe 4.1.2.b.
- CHRONO DE RAYONNEMENT : Fichier similaire au fichier de résultat précédent, mais les résultats sont fournis tous les n pas de temps.
- HISTORIQUE RAYONNEMENT : valeurs de la température sur les facettes de rayonnement qui ont été choisies

6.17.3 Exemple pour un calcul SYRTHES + couplage avec la thermohydraulique

Les fichiers purement relatifs à SYRTHES sont inchangés. Seuls les fichiers supplémentaires sont explicités ci-dessous.

6.17.3.a Fichiers amont

Aucun fichier supplémentaire.

6.17.3.b Fichiers suite

- STOCKAGE DES CORRESPONDANTS : Dans le cas où l'utilisateur a demandé une sauvegarde ou une relecture des correspondants, le nom du fichier lui est demandé (cf. **??**)

6.17.3.c Fichiers résultats

- MAILLAGE PEAU FLUIDE : Géométrie de la peau du fluide en contact avec le solide. Il s'agit d'un maillage surfacique (segments en 2D et triangles en 3D). Ce maillage pourra être utilisé pour le post-traitement des résultats sur la peau du fluide.
- RESULTATS PEAU FLUIDE : Résultats sur tous les nœuds de la peau du fluide en contact avec le solide. Il s'agit de résultats directement calculé par le code de thermohydraulique (température fluide et coefficient d'échange).
- CHRONO PEAU FLUIDE : Fichier similaire au fichier de résultats précédent, mais les résultats sont fournis tous les n pas de temps.

Ces fichiers n'existent que si l'option a été demandée par l'utilisateur (cf. 6.5.3)

Les sous-programmes utilisateur 7

Afin de faciliter l'utilisation du code, il est possible de définir de nombreuses conditions directement dans le fichier de données : de cette façon, aucune programmation n'est nécessaire et les conditions peuvent être modifiées sans compilation ni édition des liens. Si cette technique est très avantageuse d'un point de vue ergonomie, elle présente cependant des limitations : elle ne peut traiter que les conditions constantes spatialement par bloc et surtout, elle ne peut prendre en compte les conditions instationnaires.

Un certain nombre de sous-programmes est à la disposition de l'utilisateur pour la définition de conditions plus complexes : fonctions du temps, fonctions de la température[1] locale, variables en chaque point de l'espace,...

On se propose maintenant de passer en revue l'ensemble de ces sous-programmes et d'en décrire les spécificités. Dans tous les programmes, le début des interventions utilisateur est spécifié par

"INTERVENTION UTILISATEUR A PARTIR DE CETTE LIGNE"

On ne reprendra pas ici la totalité de chaque sous-programme mais simplement la portion destinée au codage des spécificités de l'utilisateur. Les commentaires relatifs aux lignes de programme apparaissent en italique.

7.1 Initialisation de la température : INITMP

Ce sous-programme permet de donner une température initiale au solide. Elle peut être variable en espace.

Le contenu des variables :

▷ $TMPS(i)$: température au nœud solide i,

La figures 7.1 décrit l'initialisation de la température.

7.2 Caractéristiques physiques : CPHYSO

Le rôle de ce sous-programme est d'affecter à chaque nœud ou élément les caractéristiques physiques décrivant le matériau.

Les caractéristiques variables sont :
- la masse volumique (kg/m^3)

[1]On rappelle que dans SYRTHES, la température est toujours exprimée en degrés Celsius

Tous les nœuds du maillage solide

```
C     Pour chaque point solide
      DO 100 N=1,NPOINS
C
C         Coordonnees du noeud courant
          XX = COORDS(N,1)
          YY = COORDS(N,2)
          IF (NDIM.EQ.3) ZZ = COORDS(N,3)
C
C         Numero de reference du noeud
          NUMREF = NREFS(N)
C
C         Si le noeud courant porte la reference 4
          IF (NUMREF.EQ.4 ) THEN
            TMPS(N)  = 20.D0
          ELSE
            TMPS(N)  = 10.D0
          ENDIF
C
  100 CONTINUE
```

Coordonnées du nœud courant (suivant la dimension du problème il existe une coordonnée z ou non)

Numéro de référence du nœud solide courant

Si le nœud porte la référence 4 la température initiale du solide est fixée à 20°C. Pour tous les autres nœuds, elle est fixée à 10°C.

FIG. 7.1 – Initialisation de la température

- la chaleur spécifique (J/kgK)
- la conductivité thermique (W/mK)

La figure suivante présente la partie du sous-programme *cphyso.F* qui permet de définir les propriétés physiques aux **nœuds** du maillage. L'utilisateur trouvera dans le sous-programme des sections similaires destinées à l'entrée des propriétés physiques par élément ou par nœud par élément. En fonction du choix qui été fait au niveau du fichier de paramètres (voir 6.2.4), l'utilisateur remplira la section correspondante du sous-programme.

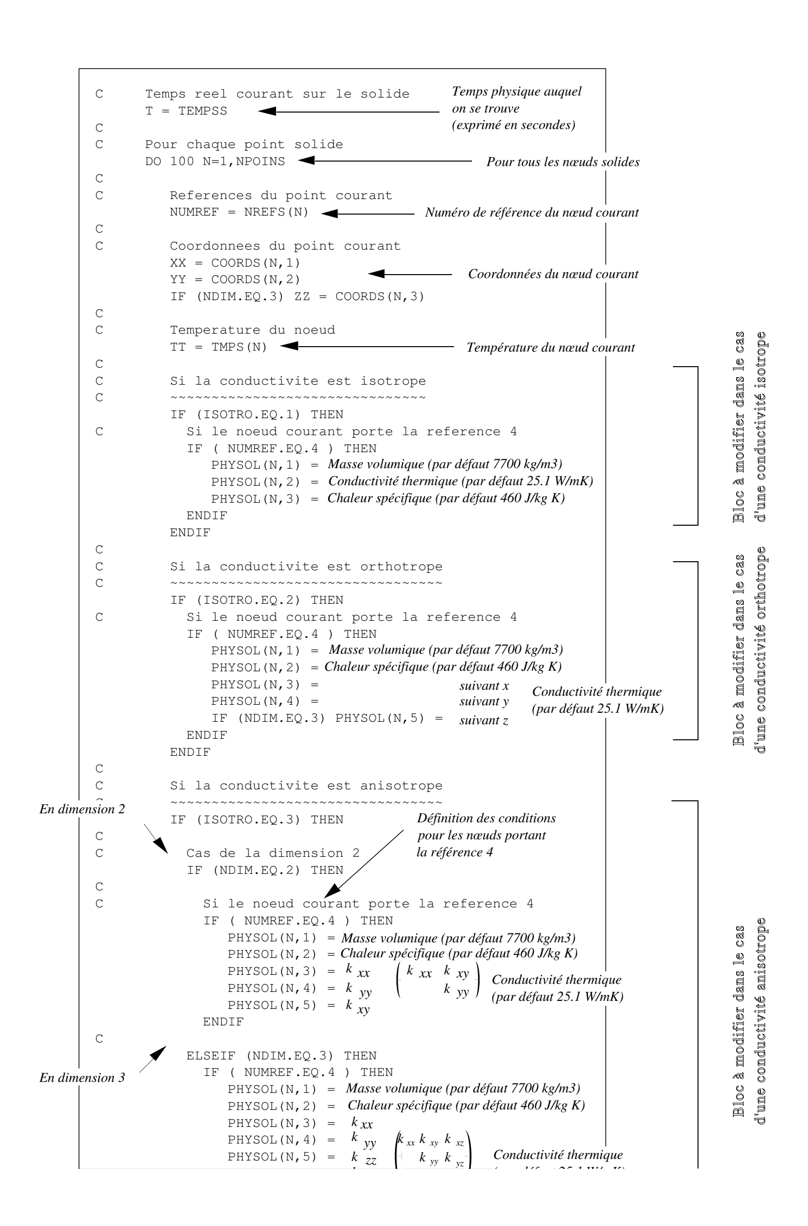


FIG. 7.2 – Programmation des conditions physiques par nœud

7.3 Conditions limites sur les nœuds : LIMSOL

Ce sous-programme est à utiliser lorsque l'option 'CONDITIONS LIMITES PAR NOEUD OU FACE' est choisie égale à 'NOEUD'. La partie utilisateur est découpée en 4 blocs, chacun étant dédié à un type de condition à la limite. Si, dans le problème physique traité un des types de condition n'intervient pas, les lignes seront laissées en commentaire.

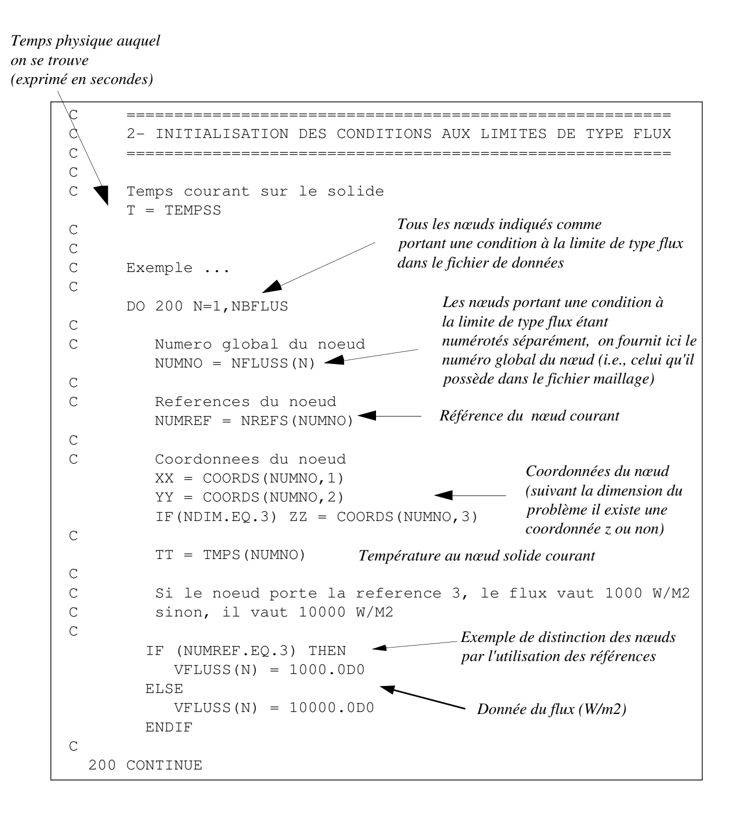


FIG. 7.3 – Codage des conditions aux limites de type flux

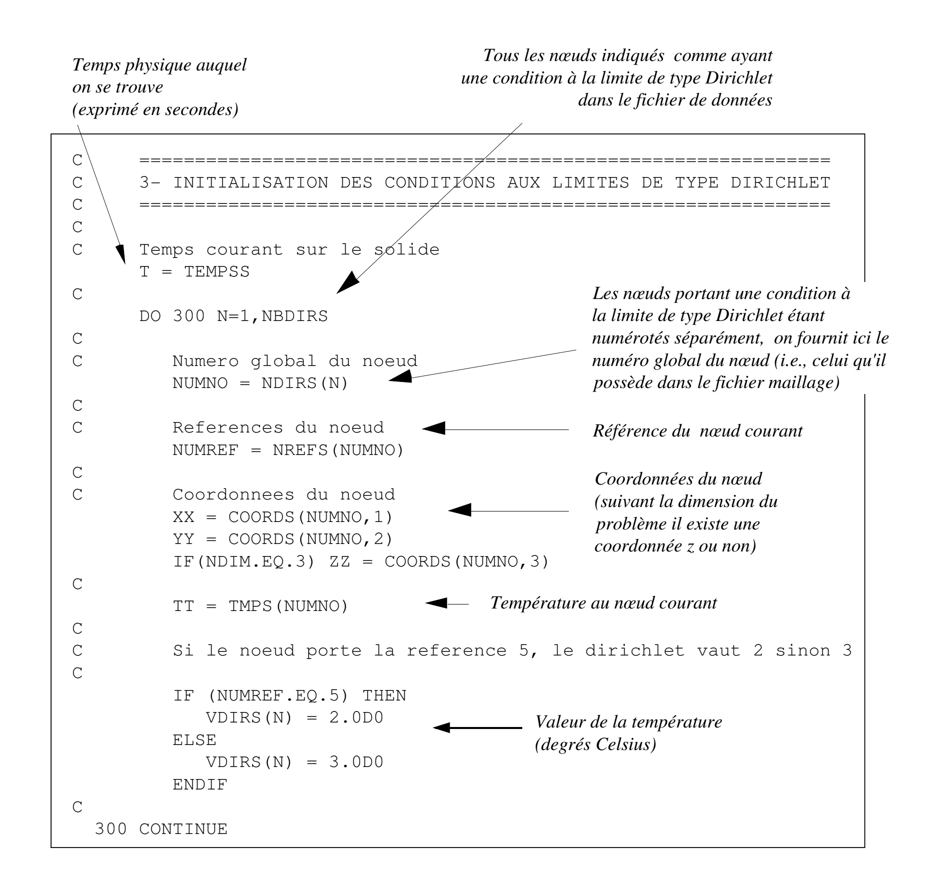


Fig. 7.4 – Codage des conditions aux limites de type Dirichlet

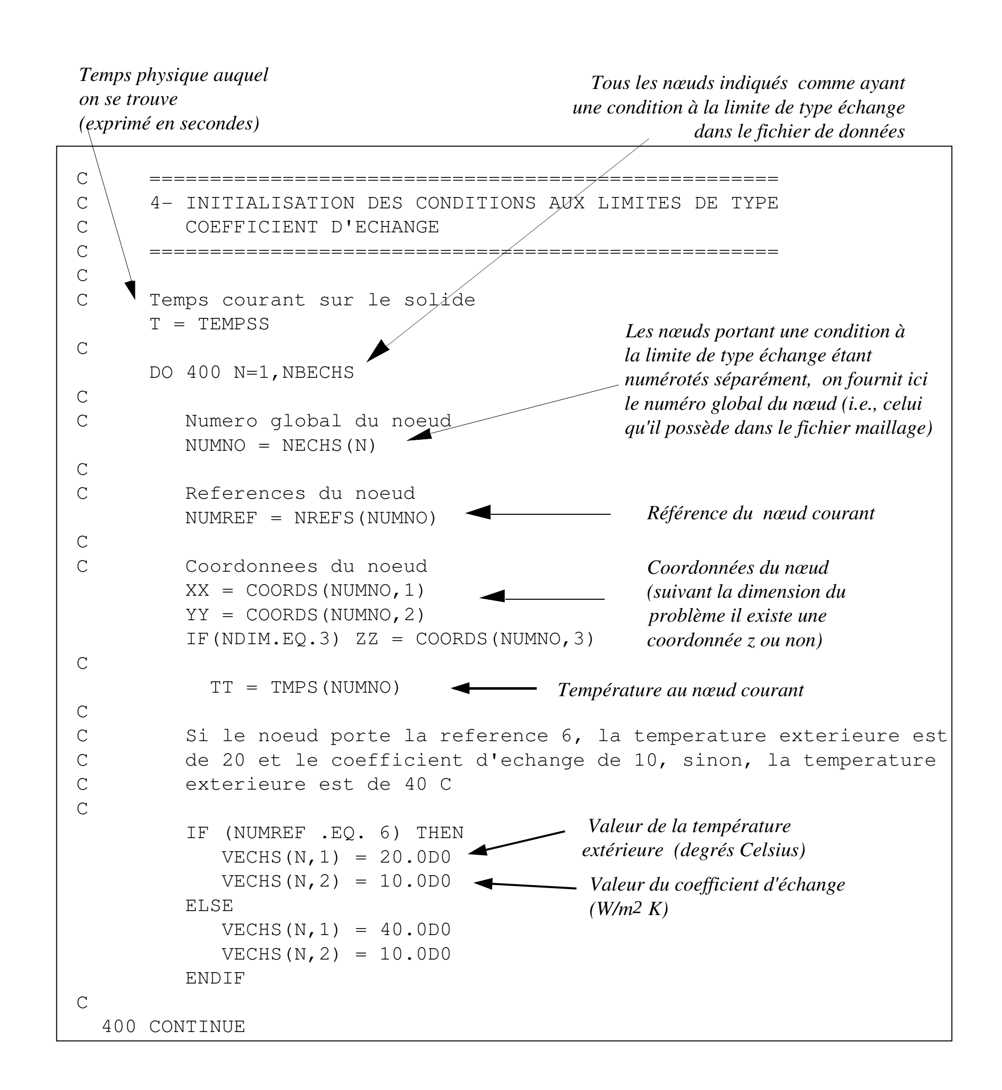


FIG. 7.5 – Codage des conditions aux limites de type coefficient d'échange

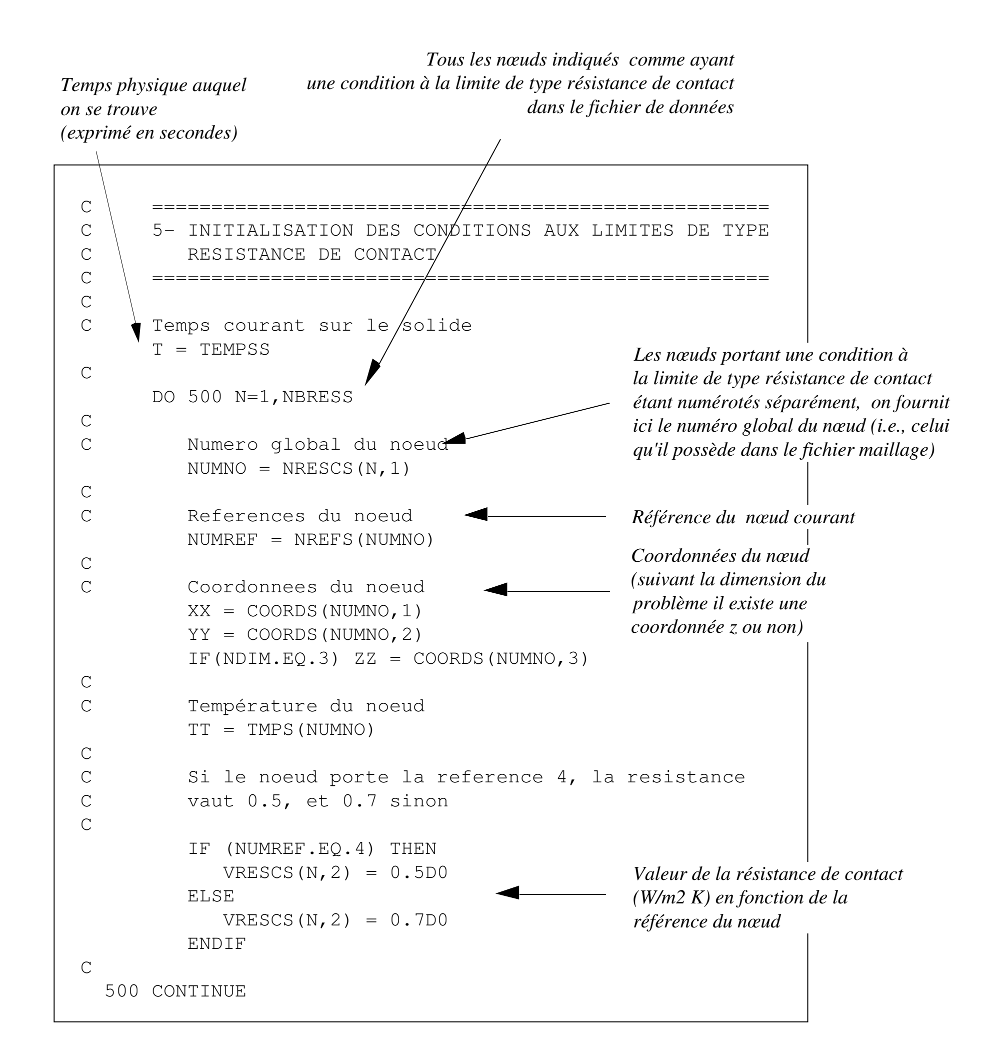


FIG. 7.6 – Codage des conditions aux limites de type coefficient résistance de contact

7.4 Conditions aux limites sur les faces : LIMFSO

Ce sous-programme est à utiliser lorsque l'option 'CONDITIONS LIMITES PAR NOEUD OU FACE' est choisie égale à 'FACE'.

Dans ce cas, toutes les conditions aux limites (hormis Dirichlet, où par définition la température est imposée sur les nœuds) sont imposées sur les faces.
Au niveau du sous-programme, l'utilisateur doit fournir pour chaque face, la valeur de la condition en chacun de ses nœuds.

Le principe de mise en place des conditions aux limites est similaire à celui décrit dans le cas des conditions aux limites imposées sur les nœuds : on se contentera donc d'expliciter la méthodologie dans le cas de la définition d'une condition de type flux. Pour les autres conditions, la technique est en tout point similaire et on pourra se reporter au paragraphe précédent pour la signification des variables utilisées.

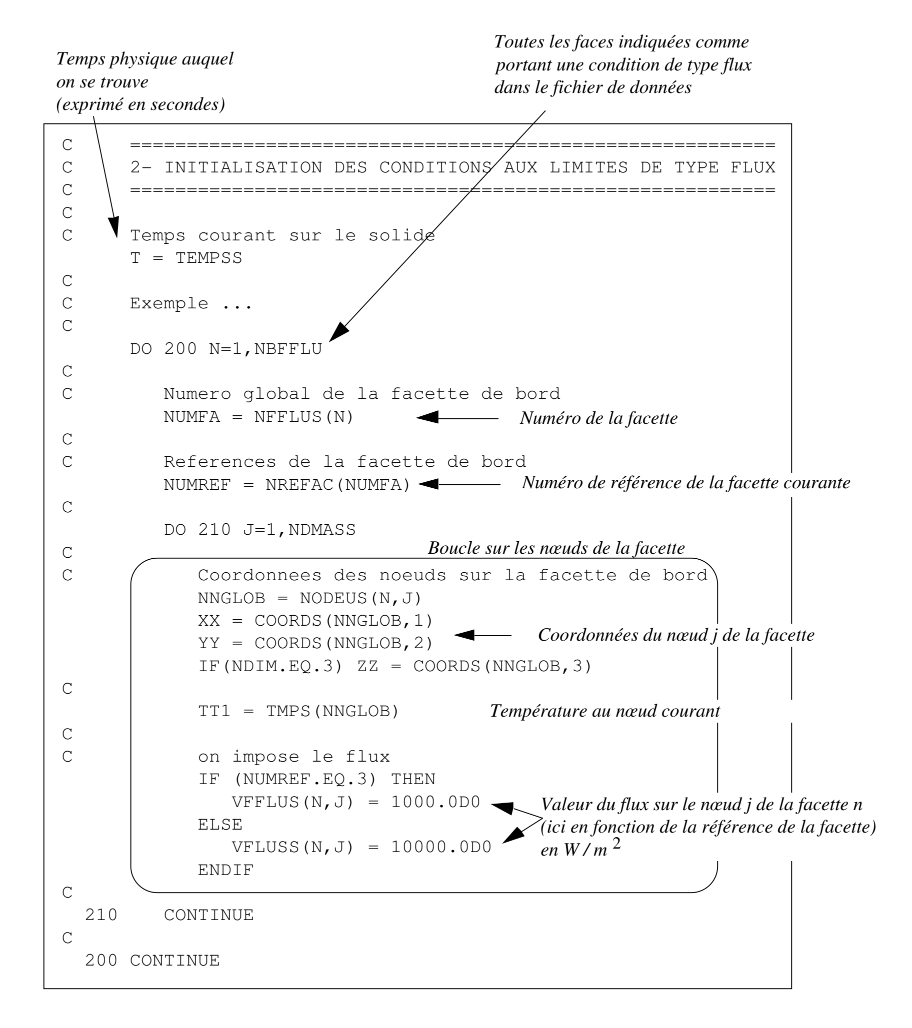


FIG. 7.7 – Condition aux limites de type flux sur les faces

7.5 Flux volumiques : CFLUVS

Les flux volumiques peuvent être fonction de l'espace, du temps, et de la température locale.

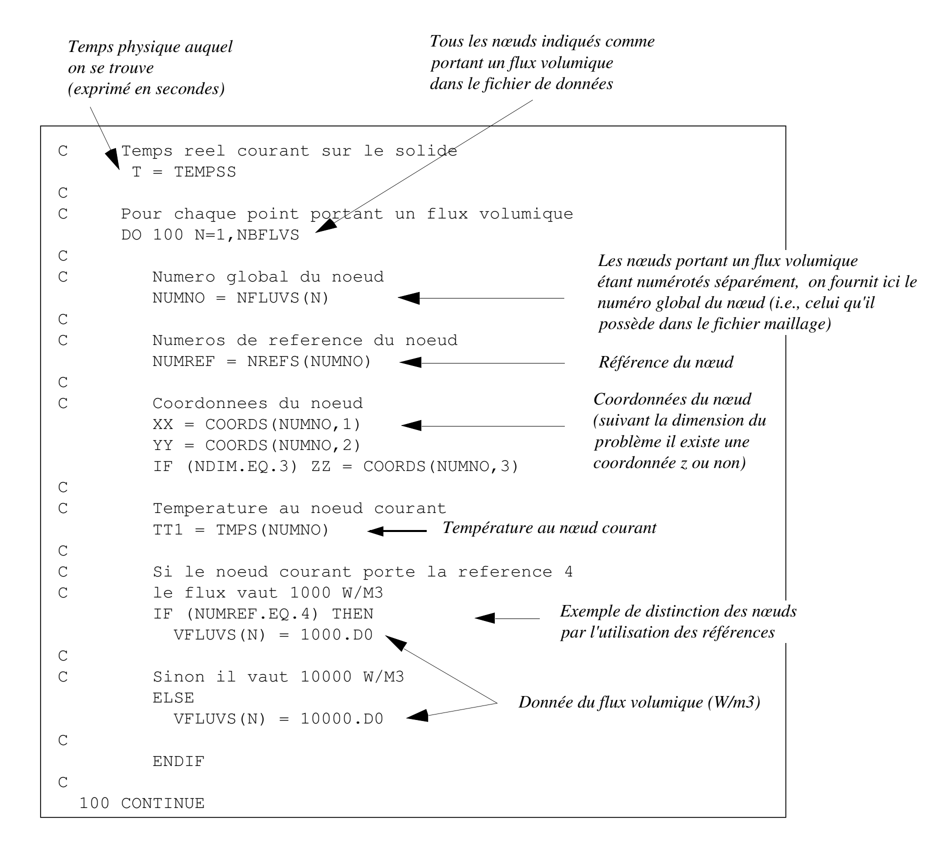


FIG. 7.8 – Codage des flux volumiques

7.6 Références des faces : INREFA

Ce sous-programme n'est utile que dans le cas particulier où le mailleur utilisé ne fournit pas de références sur les faces et que l'utilisateur souhaite appliquer ses conditions aux limites sur les faces : la mise en place des références sur les faces est alors à la charge de l'utilisateur par le biais du sous-programme $INREFA$.

Il est à noter que la programmation de ce sous-programme peut s'avérer extrêmement fastidieuse (surtout en dimension 3 où la complexité des configurations rencontrées est importante) : il convient donc de bien analyser son problème avant d'entreprendre sa programmation afin de s'assurer qu'il n'est pas possible de traiter le problème en condition par nœud.

Le principe du sous-programme est simple : pour un maillage donné, il s'agit de parcourir chaque élément et pour chaque élément, on parcourt toutes ses faces. Il est à noter, qu'en dimension 2, les "faces" des éléments sont constituées par les arêtes des triangles.

Dans le cas de la dimension 3, le principe est exactement le même. La figure ci-dessous présente simplement la numérotation des nœuds sur la facette courante.

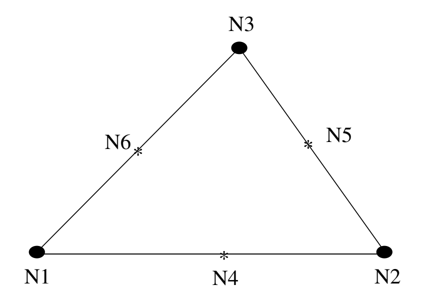


Fig. 7.9 – Numéros des nœuds sur une facette de tétraèdre

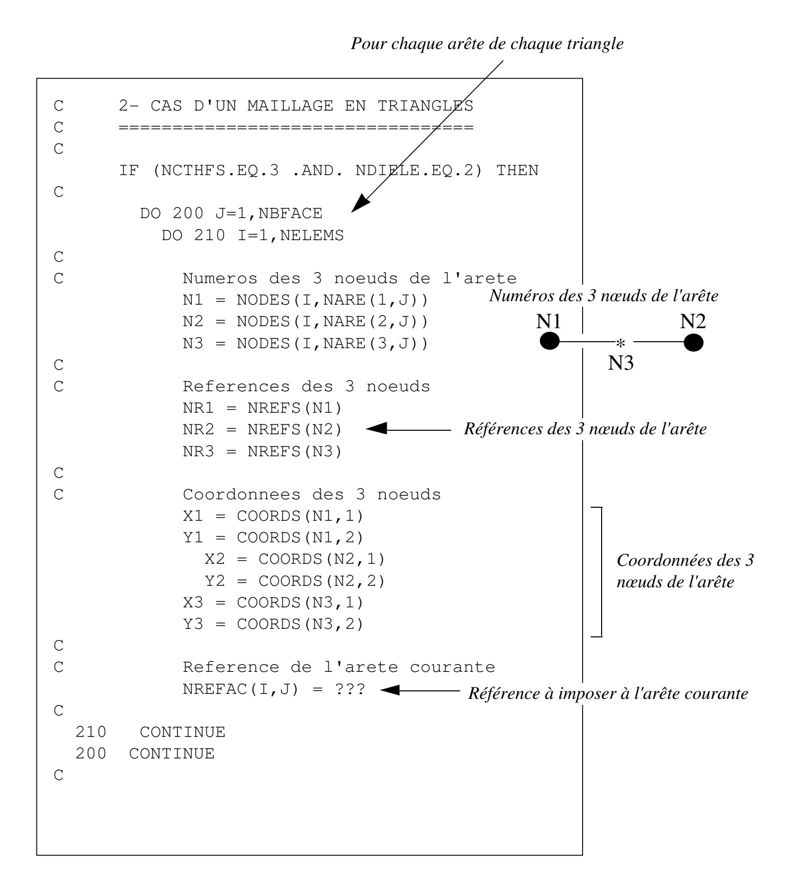


FIG. 7.10 – Mise en place des références sur les faces en dimension 2

7.7 Sous-programme utilisateur : LIMRAY

Comme nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les propriétés physiques et conditions aux limites pour le rayonnement sont généralement fournies dans l'interface et indiquées dans le fichier de données *syrthes.ray*.
Cependant, les conditions qui sont fournies par le biais de ce fichier sont supposées être constantes dans le temps.
Or, dans certains cas plus complexes, il est parfois nécessaire de disposer de conditions variables en fonction du temps, de la température, de l'espace, etc...Dans ce cas, on a alors recours au sous-programme utilisateur qui permet de décrire les comportements des diverses variables même lorsque ces derniers sont très complexes.

Au niveau du traitement du rayonnement, l'ensemble des conditions modifiables par l'utilisateur est accessible dans le sous-programme *limray.F*.

On a ainsi la possibilité de programmer les variations :
- de l'émissivité
- de la température des faces à "température imposée"
- du flux des faces à "flux imposé"

Enfin, on a également accès à la définition des bandes spectrales, dans le cas où l'utilisateur préfèrerait les définir dans ce sous-programme plutôt que dans le fichier de données.

Dans tout le sous-programme, on accède au temps physique par le biais de la variable TEMPSS.

7.7.1 Définition des bandes spectrales

La partie du sous-programme *limray* qui est destinée à la définition des bandes spectrales est la suivante :

```
C      ================================================================
C      1- DEFINITION DES BANDES SPECTRALES
C      ================================================================
C      Definition des bandes spectrales si besoin est
C      Le nombre de bandes spectrales,NBANDE est defini dans le fichier
C      de mots-cles Syrthes.ray
C      Exemple : si le nombre de bandes (NBANDE) vaut 2, avec en metres
C                Premiere bande lambda_1 = 0      , lambda_2 = 5.e-6 (m)
C                Deuxieme bande lambda_1 = 5.e-6 , lambda_2 = 1.
CUTI           SPECTL(1,1) = 0       <------  Bande 1, borne inférieure
CUTI           SPECTL(1,2) = 5.e-6   <------  Bande 1, borne supérieure
CUTI           SPECTL(2,1) = 5.e-6   <------  Bande 2, borne inférieure
CUTI           SPECTL(2,2) = 1.      <------  Bande 2, borne supérieure
```

FIG. 7.11 – Définition des bandes spectrales

- le nombre maximal de bandes spectrales est actuellement fixé à 100
- le nombre de bandes spectrales que l'on souhaite définir doit être indiqué dans le fichier de mots-clés.
  cf. 'NOMBRE DE BANDES SPECTRALES POUR LE RAYONNEMENT=' (page 65)
- SPECTL(i,1) : borne inférieure de la ième bande spectrale
  SPECTL(i,2) : borne supérieure de la ième bande spectrale

7.7.2 Définition des émissivités

La partie du sous-programme *limray* qui est destinée à la définition des émissivités est la suivante :

```
C      ============================================================
C      2- DEFINITION DE l'EMISSIVITE POUR LE RAYONNEMENT
C      ============================================================
C
C      Exemple ...
C
CUTI   DO 200 N=1,NELRAY          <---- Pour chaque facette de rayonnement
C
C         References de la face
CUTI      NUMREF = NRFRAY(N)      <----------------  Référence de la facette
C
C         Coordonnees des noeuds de la face
CUTI      XX1 = COORAY(NODRAY(N,1),1)
CUTI      YY1 = COORAY(NODRAY(N,1),2)      <-------  Coordonnées du noeud 1 de la face
CUTI      IF(NDIM.EQ.3) ZZ1 = COORAY(NODRAY(N,1),3)
C         ...
C
C         Temperature de la face de rayonnement
CUTI      TTFAC = TEMRAY(N)       <----------------  Température de la facette courante
C
C         Exemple
C         Si la face porte la reference 3, l'emissivite vaut
C               0.7   pour la premiere bande
C               0.95  pour la deuxieme bande
C         sinon, elle vaut 0.5 (elle peut eventuellement dependre de la
C         temperature de la face calculee precedement (TTFAC)
C
CUTI      IF (NUMREF.EQ.3) THEN   <---- Si la référence de la facette est 3
CUTI         EMISSI(N,1) = 0.7                 Emissivité pour la bande 1
CUTI         EMISSI(N,2) = 0.95                Emissivité pour la bande 2
CUTI      ELSE                    <---- Pour les autres facettes
CUTI         EMISSI(N,1) = 0.5                 Emissivité pour la bande 1
CUTI         EMISSI(N,2) = 0.5                 Emissivité pour la bande 2
CUTI      ENDIF
C
CU200 CONTINUE
```

FIG. 7.12 – Définition des émissivités

La boucle est réalisée sur tous les éléments du maillage de rayonnement.

Pour une facette N, on a accès :
- aux coordonnées des nœuds de la facette
  COORAY(NODRAY(N,i),j) : jème coordonnée du ième nœud de la facette N
  en dimension 2 $i, j \in [1, 2]$, en dimension 3 $i, j \in [1, 3]$,
- à la température de la facette : TTFAC,
- à la référence de la facette : NUMREF.

Et il faut donner :
- l'émissivité pour la bande i : EMISSI(N,i).

7.7.3 Définition des températures imposées sur les facettes

La partie du sous-programme *limray* qui est destinée à la définition des températures de facettes est la suivante :

La boucle est réalisée sur les faces du maillage qui portent la condition à la limite 'RAYONNEMENT : REFERENCES FACES TEMPERATURE IMPOSEE' (cf. page 66)

Pour une facette N, on a accès :
- au numéro global de la facette : NGFAC,
- à la référence de la facette : NUMREF,
- aux coordonnées des nœuds de la facette
  COORAY(NODRAY(N,i),j) : jème coordonnée du ième nœud de la facette N
  en dimension 2 $i, j \in [1, 2]$, en dimension 3 $i, j \in [1, 3]$.

```
C      ================================================================
C      3- DEFINITION DES TEMPERATURES DE FACES IMPOSEE
C      ================================================================
C
CUTI   DO 300 N=1,NFTIRA
C
C         Numero global de la face
CUTI      NGFAC = NGFTIR(N)
C         Reference de la face
CUTI      NUMREF = NRFRAY(NGFAC)
C
C         Coordonnees des noeuds de la face
CUTI      XX1 = COORAY(NODRAY(NGFAC,1),1)
CUTI      YY1 = COORAY(NODRAY(NGFAC,1),2)
CUTI      IF(NDIM.EQ.3) ZZ1 = COORAY(NODRAY(NGFAC,1),3)
C         ...
C
C         Exemple
C         Attention : La temperature de la face de rayonnement est en degre C
C         La references 5 designe une entree T = 30 degre C
C         La references 6 designe une sortie T = 50 degre C
C
CUTI      IF ( NUMREF .EQ. 5 ) THEN
CUTI         TEMRAY(NGFAC) = 30.
CUTI      ELSEIF ( NUMREF .EQ. 6 ) THEN
CUTI         TEMRAY(NGFAC) = 50.
CUTI      ENDIF
C
CU300 CONTINUE
```

Pour chaque facette de rayonnement à température imposée

Numéro de la facette

Référence de la facette

Coordonnées du premier noeud de la facette

Si la facette porte la référence 5, la température est imposée à 30 C

Si la facette porte la référence 6, la température est imposée à 50 C

FIG. 7.13 – Définition des températures imposées sur les facettes

Et il faut fournir :
- la température à imposer sur la facette : TEMRAY(NGFAC)
  (la température doit être donnée en degrés C).

7.7.4 Définition des flux imposés sur les facettes

La partie du sous-programme *limray* qui est destinée à la définition des flux sur les facettes est la suivante :

La boucle est réalisée sur les faces du maillage qui portent la condition à la limite 'RAYONNEMENT : REFERENCES FACES FLUX IMPOSE' (cf. page 66)

Pour une facette N, on a accès :
- au numéro global de la facette : NGFAC,
- à la référence de la facette : NUMREF,
- aux coordonnées des nœuds de la facette
  COORAY(NODRAY(N,i),j) : jème coordonnée du ième nœud de la facette N
  en dimension 2 $i, j \in [1, 2]$, en dimension 3 $i, j \in [1, 3]$.

Et il faut donner :
- le flux à imposer sur la facette pour la bande i : VFIRAY(N,i,1)
  (le flux doit être donné en W/m^2).

```
C     ================================================================
C     4- DEFINITION DES FACES A FLUX IMPOSE PAR BANDE
C     ================================================================
C
CUTI  DO 400 N=1,NFFIRA          <----  Pour chaque facette de rayonnement à flux imposé
C
C        Numero global de la face
CUTI     NGFAC = NGFFIR(N)       <----  Numéro de la facette
C        References de la face
CUTI     NUMREF = NRFRAY(NGFAC)  <----  Référence de la facette
C
C        Coordonnees des noeuds de la face
CUTI     XX1 = COORAY(NODRAY(NGFAC,1),1)
CUTI     YY1 = COORAY(NODRAY(NGFAC,1),2)  <----  Coordonnées du premier noeud de la facette
CUTI     IF(NDIM.EQ.3) ZZ1 = COORAY(NODRAY(NGFAC,1),3)
C        ...
C
C        Exemple
C        On a une seule bande spectrale --> NUMBAN = 1
C        Si la reference de la face vaut 7 on a une paroi adiabatique
C        Si la reference de la face vaut 3 on a un flux de 500 W/m2
C
CUTI     NUMBAN = 1              <----  Pour la bande 1
C
CUTI     IF ( NUMREF .EQ. 7 ) THEN
CUTI        VFIRAY(N,NUMBAN,1) = 0.      <----  Si la facette porte la référence 7,
CUTI     ELSEIF ( NUMREF .EQ. 3 ) THEN            le flux est imposé à 0 W/m2K
CUTI        VFIRAY(N,NUMBAN,1) = 500.    <----  Si la facette porte la référence 3,
CUTI     ENDIF                                    le flux est imposé à 500 W/m2K
C
CU400 CONTINUE
```

Fig. 7.14 – Définition des flux imposés sur les facettes

Deuxième partie

SYRTHES - Mise en œuvre

Méthodologie pour la réalisation d'un calcul 8

SYRTHES a été conçu pour que la méthodologie pour la réalisation d'un calcul soit identique qu'il s'agisse d'un calcul solide uniquement ou d'un calcul couplé fluide/solide.

Quel que soit le type d'application visé à terme, on conseille donc toujours de s'initier à SYRTHES dans le cadre de calculs simples de conduction/rayonnement uniquement. Même si l'objectif final est la réalisation de calculs couplés fluide/ solide, cet investissement sera pleinement rentabilisé puisque la méthode pour la réalisation d'un calcul reste inchangée. En effet, de façon simplifiée, le fluide n'intervient que comme une condition à la limite particulière du domaine solide.

SYRTHES, en tant que module couplé à un code fluide a été conçu afin de permettre de "découpler" entièrement les problèmes fluide et solide : ils peuvent être analysés séparément, et dans le cas des problèmes complexes, il est possible de commencer par la réalisation du calcul fluide seul pour mieux appréhender les difficultés et mettre au point le calcul. Dans un second temps, le couplage pourra être mis en œuvre, sans aucune perte d'investissement[1].
De même, si un utilisateur se trouve confronté à des problèmes numériques, il doit toujours garder à l'esprit, que le débranchement total de SYRTHES est immédiat ; il est simplement réalisé par le biais d'un mot-clé dans le fichier de commandes du code fluide. Cela peut faciliter l'identification ou la localisation de la source du problème. Est-ce un problème purement fluide, un problème purement solide, ou bien lié au transfert des données entre domaines fluide et solide.

Dans ce chapitre, on s'attachera à décrire la méthodologie généralement employée pour la réalisation d'un calcul. En particulier on décrira la liste des étapes et leur chronologie.

Dans le cas des calcul couplés fluide/solide, on ne s'attardera pas sur les notions nécessaires à la bonne conduite d'un calcul fluide pour lesquelles l'utilisateur pourra se reporter au manuel relatif au code fluide utilisé.

8.1 Mise en œuvre d'un calcul SYRTHES

Après avoir énuméré les principales étapes de la réalisation d'un calcul, nous reviendrons sur certaines d'entre elles pour en préciser les points importants. Les phases de réalisation d'un calcul s'articulent de la façon suivante :

- analyse du problème physique, choix du domaine de calcul, des modèles physiques,
- réalisation du maillage non structuré du domaine solide, mise en place des références pour la distinction des futures conditions aux limites, conditions physiques, etc ...

[1]Cependant, la présence de flux thermiques non nuls en paroi induits par le couplage peut engendrer des difficultés qui n'apparaissaient pas sur le calcul fluide simplifié

Si le cas nécessite le calcul des transferts radiatifs, réalisation du maillage destiné au traitement du rayonnement.

- mise à jour du fichier de données pour la conduction et éventuellement pour le rayonnement,
- mise à jour (si besoin est) des sous-programmes utilisateur pour le traitement :
  - ▷ des conditions initiales,
  - ▷ des conditions physiques,
  - ▷ des conditions aux limites,
  - ▷ des flux volumiques au niveau du solide,
  - ▷ du rayonnement.
- mise à jour du programme principal pour le dimensionnement des deux "super-tableaux",
- mise à jour éventuelle du fichier de commandes du batch ou du fichier d'environnement *syrthes.env* (suivant les machines),
- lancement du calcul,
- et si tout se passe bien, analyse des résultats....

8.1.1 Mise en œuvre d'un calcul couplé SYRTHES-code fluide

Pour une utilisation optimale, il est conseillé aux utilisateurs de bien préparer et de bien organiser leur cas d'un point de vue analyse, démarche et structuration informatique. Souvent ce travail amont s'avère très rentable par la suite. Cette règle déjà valable lors de l'utilisation d'un code de thermohydraulique devient d'autant plus cruciale que le couplage thermique fluide-solide fait intervenir davantage de mécanismes physiques et de fichiers. La relative souplesse d'utilisation du module SYRTHES, son indépendance vis-à-vis des fichiers du code fluide devrait permettre, pour un utilisateur averti du code fluide, un passage sans problème aux fonctionnalités étendues à SYRTHES.

Pour un cas complexe faisant intervenir un couplage thermique entre fluide et paroi on peut suggérer une démarche en deux étapes :

- **1ère étape : calcul fluide seul faisant intervenir la thermique.**
  Effectuer un calcul fluide sans couplage, mais en prenant en compte les aspects thermiques. On impose sur les points qui doivent être couplés avec le module thermique solide, une condition de paroi sur la température. Il est bien sûr préférable d'imposer des températures de paroi (constantes en temps bien sûr !) qui se rapprochent de celles que l'on estime être présentes dans la réalité à la paroi. Une fois des résultats cohérents obtenus (on insiste sur le fait qu'il ne s'agit que d'un test intermédiaire permettant à l'utilisateur de progresser pas à pas dans son problème), on peut passer à la résolution proprement dite du problème.

- **2ème étape : calcul thermique couplé entre fluide/**SYRTHES
  L'étape précédente a permis de vérifier le bon comportement du code fluide pour la résolution du problème thermique fluide. L'investissement de temps passé lors de l'étape précédente est entièrement rentabilisé. En effet, tous les fichiers liés au fluide sont alors prêts, le seul changement minime consiste à activer le couplage avec SYRTHES au niveau des paramètres du code fluide. Il s'agit là de la seule incursion visible du module thermique SYRTHES dans l'environnement familier des utilisateurs du code fluide.

8.2 Couplage *Code_Saturne*-SYRTHES : "répercussion" sur le fluide.

Comme nous l'avons souvent déjà souligné dans ce document, les problèmes fluides et solides sont traités de façon indépendante. Le seul impact sur le calcul fluide par la mise en œuvre du couplage

se situe au niveau de la condition à la limite qu'il faut imposer sur les faces de bord fluide qui seront couplées au solide.

Le maillage du domaine fluide est réalisé conformément aux contraintes engendrées par la géométrie elle-même, l'écoulement à modéliser et les critères relatifs au code [2]. Il suffit simplement d'octroyer aux faces en regard avec le solide des références particulières pour qu'elles puissent être repérées lors du couplage.

8.3 La réalisation des maillages pour SYRTHES

Le domaine solide est discrétisé grâce à un maillage non structuré. Actuellement, le code reconnaît les bases de données issues des mailleurs SIMAIL [16] ou IDEAS-MS [17].

Au cours de sa phase de réalisation, l'utilisateur doit toujours avoir présent à l'esprit son problème physique. Il devra se souvenir que :
- certaines zones sensibles où les phénomènes physiques sont importants doivent être maillées plus finement,
- la régularité des éléments facilite la convergence du calcul. On évitera en particulier les éléments qui présentent des angles supérieurs à 90° et on conservera une distorsion "raisonnable" pour chaque élément.
- c'est au moment de la conception du maillage qu'il faut prévoir les caractéristiques physiques du problème en disposant judicieusement les références sur les nœuds ou les faces. On rappelle que ces références devront permettre la distinction entre des nœuds ou faces (voire éléments) :
  - ▷ couplés avec le fluide,
  - ▷ qui portent des conditions de type flux,
  - ▷ qui portent des conditions de type Dirichlet,
  - ▷ qui portent des conditions de type coefficient d'échange,
  - ▷ qui portent des résistances de contact,
  - ▷ où l'on impose des flux volumiques,
  - ▷ qui appartiennent à des matériaux différents,
  - ▷ qui sont couplés au rayonnement.

Il est important de rappeler que les références doivent être comprises entre 1 et 99. Un nœud, une face ou un élément dont la référence est 0 (zéro) est considéré comme n'étant pas référencé.

8.4 Lancement du calcul

8.4.1 Création d'un cas de calcul

Un utilitaire est disponible pour créer automatiquement "cas de calcul", c'est-à-dire un répertoire contenant une copie de tous les fichiers qui seront éventuellement utiles pour le calcul. Ceci permet par exemple de disposer d'un fichier de données pré-rempli où seules les valeurs de quelques paramètres seront à modifier.

```
syrthes_create_case
```

8.4.2 Cas d'un calcul SYRTHES

Une fois les fichiers de données mis à jour, si des sous-programmes utilisateurs ont été programmés, l'utilisateur lancera la commande

```
link_syrthes
```

qui va s'occuper de la compilation des sous-programmes utilisateur et de l'édition des liens pour la génération de l'exécutable *syrthes*.

Après quoi, le code sera simplement lancé par la commande

```
syrthes > listing &
```

qui va lancer l'exécution de SYRTHES en tâche de fond et en redirigeant la sortie standard dans un fichier (ici nommé "*listing*" mais dont le nom sera choisi pour chaque calcul de façon à être le plus explicite possible).

8.4.3 Cas d'un calcul couplé *Code_Saturne*-SYRTHES

Les fichiers de données sont préparés indépendemment pour les deux codes. Ensuite, il s'agit d'indiquer dans le fichier de lancement de *Code_Saturne* qu'il faut prendre en compte le couplage avec SYRTHES. L'utilisateur se réfèrera à procédure de lancement de *Code_Saturne* [2] pour les détails de l'opération.

8.5 L'analyse des résultats

Le dépouillement d'un calcul commence toujours par l'analyse du fichier listing.

S'il s'agit des tous premiers essais pour un nouveau problème, on s'attardera sur les informations fournies par la phase d'initialisation : on pourra par exemple contrôler l'ordre de grandeur du nombre des nœuds, des éléments, des nœuds soumis à telle ou telle condition à la limite, etc ...

Ces premières vérifications visent plusieurs objectifs :
- contrôler ses propres données : une condition n'a-t-elle pas été omise, références et type de condition sont-ils bien en accord, les valeurs des conditions aux limites sont-elles exactes,...
- s'assurer qu'il y a adéquation entre ce que l'on **voulait** faire et ce que le code a **interprété**,
- s'assurer que les initialisations se sont déroulées de façon normale et que tout semble cohérent.

Le déroulement du calcul
A chaque pas de temps, il est possible d'avoir des informations sur la convergence du solveur (niveau d'impression ≥ 2). Lorsque l'on recherche un état stationnaire, le nombre des itérations nécessaires au solveur pour atteindre une convergence donnée tend à décroître au fil des pas de temps : le calcul se déroule de façon normale.

La convergence du solveur
Si des difficultés de convergence apparaissent (nombre d'itérations élevé, précision atteinte médiocre), il est généralement possible d'améliorer le conditionnement du système en adoptant un pas de temps plus petit.

Dans le cas des calculs instationnaires, il est important d'obtenir une bonne convergence du solveur à chaque pas de temps. Si la précision atteinte par le solveur reste moyenne (de l'ordre de 10^{-4} par exemple), il faut envisager d'augmenter le nombre d'itérations du solveur ou de choisir un pas de temps plus petit. Ceci est d'autant plus important que le calcul fait intervenir des conditions de type flux surfaciques ou volumiques.

L'appréciation de la convergence
Dans tous les calculs numériques, l'appréciation de la convergence reste souvent délicate et est un souci majeur pour l'utilisateur : effectivement, il n'existe pas de critère absolu permettant d'affirmer qu'un calcul est convergé. Il faudra donc utiliser un certain nombre d'"indicateurs" qui seront autant d'aides à l'appréciation de la convergence. On pourra notamment citer :

- le comportement du solveur itératif (réduction du nombre d'itérations nécessaires pour l'obtention d'une bonne précision),
- la génération des historiques en plusieurs points "stratégiques" du domaine : l'examen de ces historiques peut faire apparaître des courbes tendant vers des asymptotes,...
- l'analyse des résultats dans le post-processeur : l'examen des profils de température en divers pas de temps montre l'évolution de la température au cours du temps,
- l'expérience de l'utilisateur...

8.6 La gestion des erreurs

Ce paragraphe propose une stratégie pour tenter de remédier aux problèmes qui peuvent se poser à un utilisateur lors de l'apparition de messages d'erreurs.

La première étape est d'analyser la nature du dysfonctionnement. Selon le résultat, on propose une démarche pour localiser le problème, et enfin les actions à entreprendre pour y remédier.

8.6.1 Les grandes familles de dysfonctionnement

On rassemble dans le schéma suivant divers types de dysfonctionnement et la démarche à suivre lorsque l'on a reconnu le scénario dans lequel on se trouve.

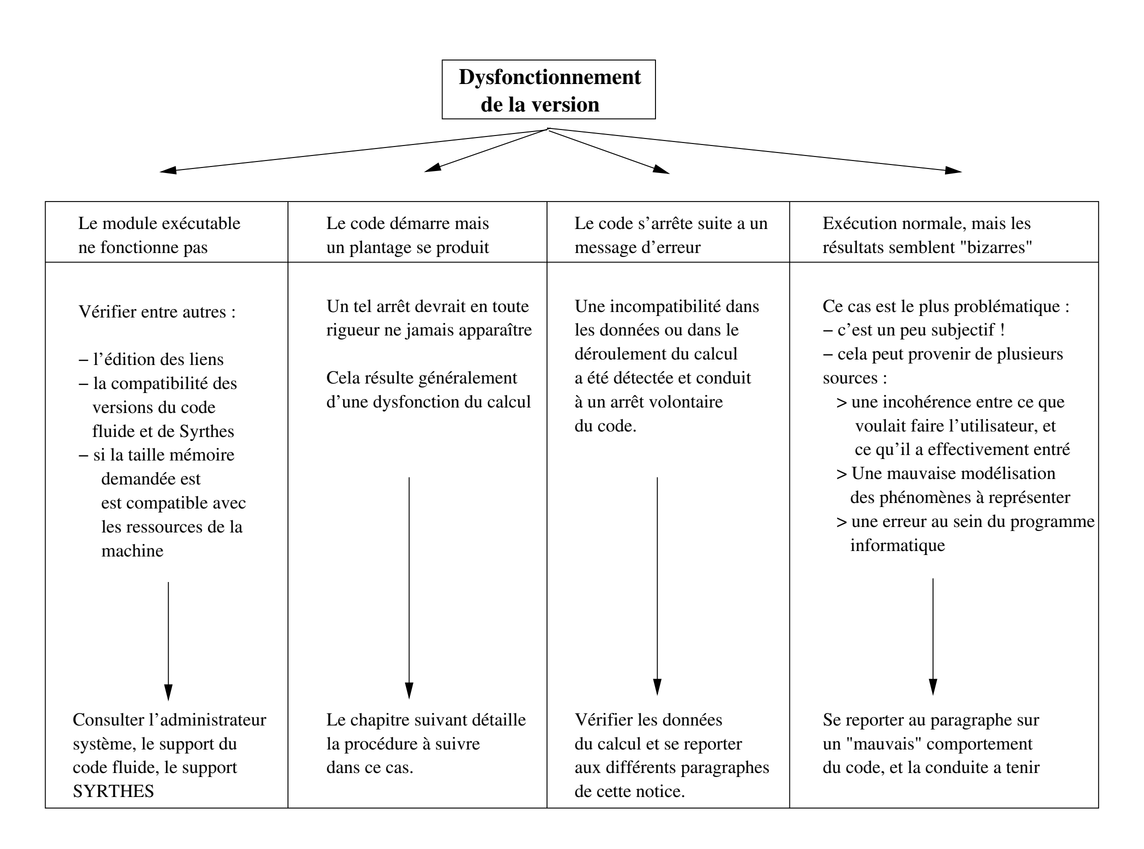


FIG. 8.1 – Tentative de classement de divers types de dysfonctionnement

8.6.2 Arrêt du code au cours de son exécution

Il peut arriver au cours d'une exécution, surtout pour des codes numériques à caractère évolutif, qu'un arrêt "intempestif" se manifeste. Cela peut survenir pour de multiples raisons ! Dans la majorité des cas, on constate qu'il s'agit de division par zéro, d'un dépassement des limites de la machine, d'une erreur d'argument sur une fonction mathématique, d'écrasement mémoire, etc...

L'utilisateur doit alors vérifier ses propres données (mots-clés, conditions aux limites, sous-programmes utilisateur). Si après vérifications, le problème subsiste, contactez l'équipe de développement de SYRTHES.

8.6.3 Que faire si un message d'erreur apparaît ?

Les codes numériques dont il est question sont des outils dont le maniement est complexe et qui demandent d'imposer un nombre conséquent de données lors de leur mise en œuvre. Pour garantir le meilleur résultat possible, de nombreux tests sont effectués au sein des codes pour vérifier la cohérence des données, et éviter des problèmes ultérieurs. De même, certains tests numériques effectués lors du calcul proprement dit permettent d'éviter la génération d'erreurs conduisant à des "plantages" informatiques.

Le code est dans ce cas stoppé proprement, et dans la majorité des cas, les concepteurs donnent l'explication la plus précise possible de l'événement qui motive l'arrêt de l'exécution. Le schéma suivant indique une démarche envisageable face à ce type de problème.

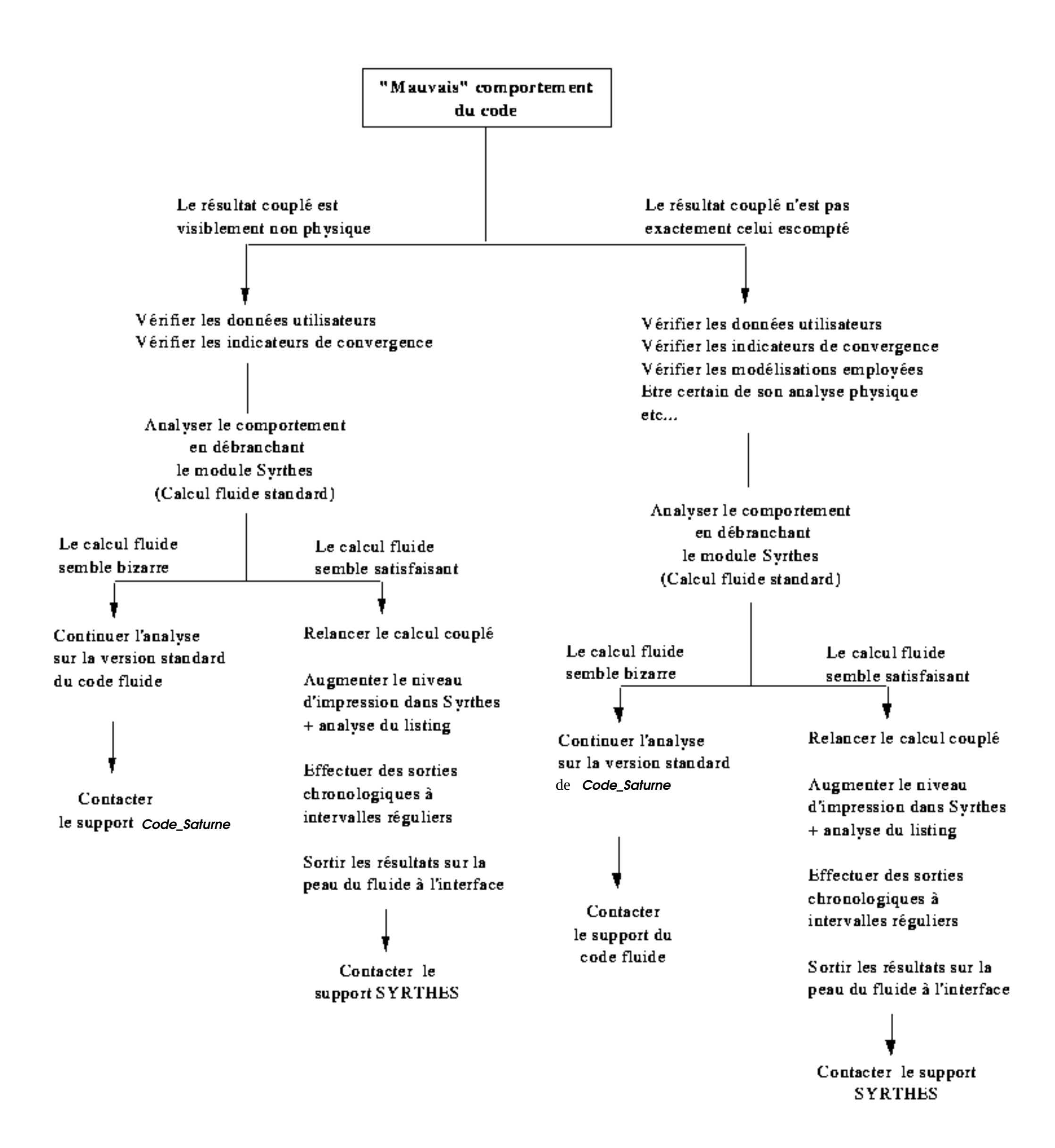


FIG. 8.2 – Méthodologie proposée face à un message d'erreur

8.6.4 Que faire en cas de mauvais fonctionnement ?

L'utilisateur est confronté à la simulation d'un problème physique complexe. Une fois le calcul effectué, même si l'exécution s'est déroulée apparemment sans problème, après une analyse critique du résultat, il peut être amené à mettre en question la validité du calcul.

Il est évident que ce type de problème est beaucoup plus ardu à appréhender que les cas précédents ; en effet la "qualité" d'un résultat numérique est une notion difficile à définir, d'autre part elle comprend une certaine part de subjectivité dans les cas complexes. Les validations effectuées aussi bien sur le code *Code_Saturne* que sur SYRTHES cherchent à réduire ce type de comportement, ou tout au moins à mieux préciser le domaine de validité de ces outils numériques.

Il peut cependant arriver que le résultat numérique obtenu soit très éloigné de la solution attendue par l'utilisateur. Comment l'utilisateur doit-il réagir face à cette situation ?

Il convient dans le cas spécifique du couplage thermique de bien identifier si la divergence numérique, ou le phénomène "bizarre" provient du fluide ou du solide, en débranchant le module SYRTHES. Cette opération est quasi immédiate, puisqu'elle s'opère simplement au niveau des paramètres des codes fluides. On comprend tout de suite que cela permet à peu de frais de restreindre de façon considérable le champ à investiguer.

Le schéma suivant résume une démarche envisageable.

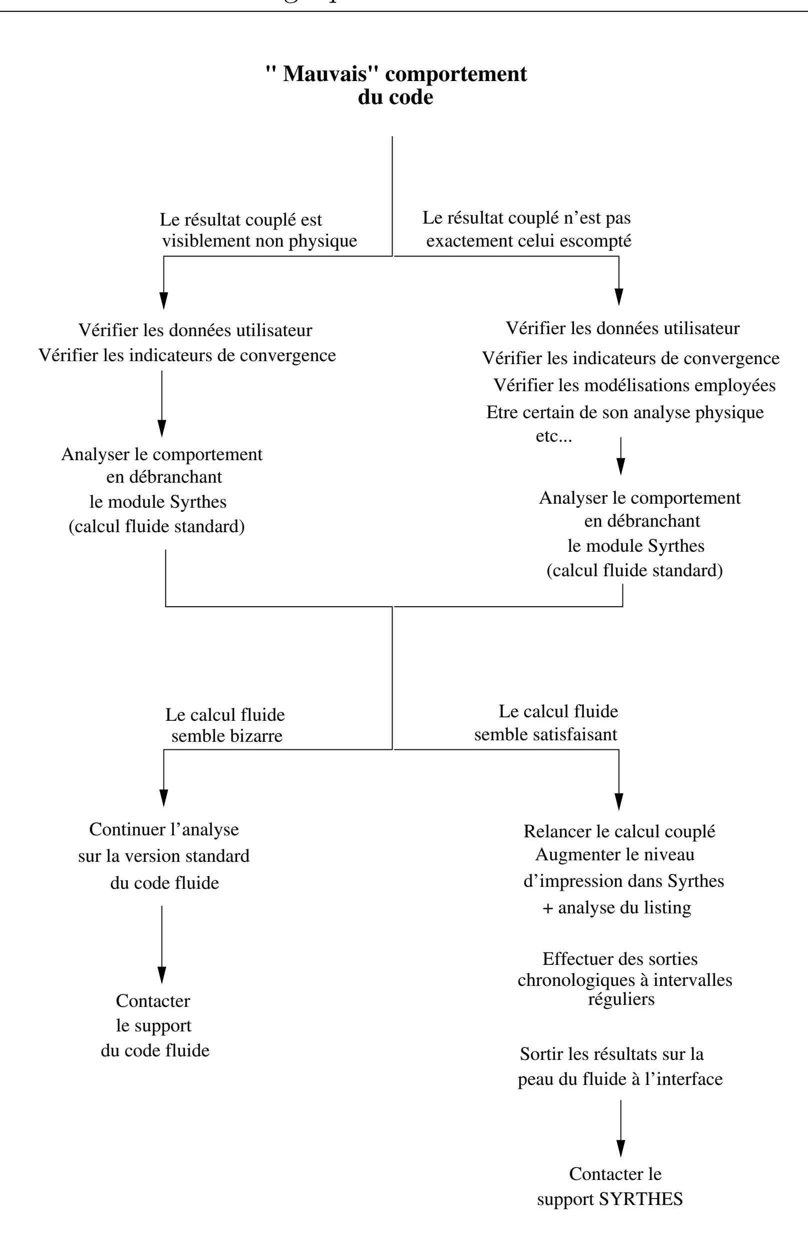


FIG. 8.3 – Méthodologie à suivre face à un "mauvais" comportement des codes fluide ou solide

Exemples 9

Nous nous proposons dans ce chapitre de décrire la réalisation de quelques cas élémentaires et de présenter la mise en œuvre d'un certain nombre d'options disponibles dans SYRTHES.

Nous proposons ici la description de 4 problèmes qui illustrent une partie des fonctionnalités de SYRTHES. Le cas *3rond2d* se veut didactique pour permettre à un nouvel utilisateur de se familiariser avec la mise en œuvre de SYRTHES. Ce cas est par conséquent traité de façon relativement générale et on effectue une description pas-à-pas de la méthodologie à suivre. En ce qui concerne les autres problèmes, on supposera acquises les bases de la mise en œuvre, pour ne s'attacher qu'aux spécificités propres au cas étudié et en décrire les mécanismes ; l'utilisateur pourra toujours se reporter à l'exemple détaillé de façon exhaustive si besoin est.

Les cas présentés dans ce chapitre sont les suivants :

- **3rond2d** : mise en œuvre d'un calcul thermique solide dans le cas de solides à comportement anisotrope,
- **Périodicité** : utilisation de la périodicité dans le cas d'une plaque de grande dimension percée de trous,
- **Résistances de contact** : utilisation des résistances de contact dans un problème donné,
- **3rond2d_ray** : mise en œuvre du rayonnement thermique,

Il est à noter que les exemples rassemblés dans ce document n'ont pour unique prétention que d'illustrer les possibilités de la version et la façon dont elle doit être utilisée. Même si les cas retenus restent assez proches de cas industriels auxquels les utilisateurs peuvent être confrontés, il faut se garder de toute conclusion sur les tendances ou résultats obtenus.

Les différents cas ont été commentés de façon plus ou moins précise en appuyant sur les spécificités propres à chaque configuration. Cela entraîne certaines répétitions, qui alourdissent un peu le document ; en contre partie, on espère que cela facilitera la compréhension.

9.1 Mise en œuvre d'un calcul thermique solide

Solides à comportement anisotrope
3rond_2d

9.1.1 Description du cas - Analyse du problème

Le domaine solide est constitué de 3 disques non connexes possédant chacun une conductivité (anisotrope) différente :

- Pour le disque 1, on impose une conductivité égale dans les directions x et y (25 W/mK) ;
- Pour le disque 2, la conductivité est de 25 W/mK dans la direction x, et 5 W/mK dans la direction y.
- Pour le disque 3, la conductivité est de 25 W/mK et 5 W/mK suivant les deux axes d'un repère local ; ce repère faisant un angle de 45° par rapport au repère de référence.

La masse volumique et la chaleur spécifique sont considérées identiques pour les 3 disques : $\rho = 7700\ kg/m^3$ et $C_p = 460\ J/kgK$.

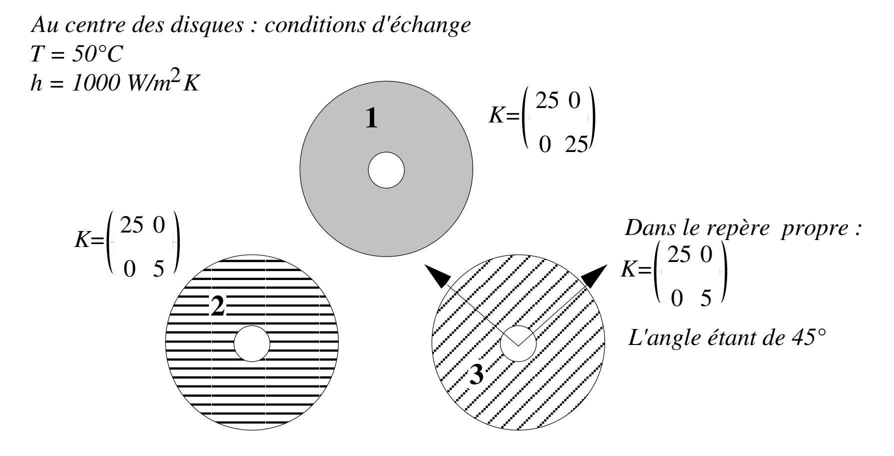


FIG. 9.1 – Schéma du problème

9.1.2 Réalisation du maillage

Si la géométrie de ce cas est très simple et ne pose aucun problème d'un point de vue maillage, il est cependant nécessaire de disposer soigneusement des références différentes sur les diverses parties du domaine. En effet, la présence simultanée de matériaux ayant des conductivités différentes implique la nécessité de les distinguer par des références différentes, ces dernières servant également à la mise en place des conditions aux limites.

Dans ce cas, il a été choisi de disposer les références sur les nœuds du maillage.
Les nœuds de chaque disque devront donc porter des références différentes, **et** au sein d'un même disque, il convient également de distinguer les nœuds soumis à la condition d'échange. Il est à noter que la condition de type flux nul étant implicite dans le code, il n'est pas nécessaire de distinguer (par une référence spécifique) les nœuds qui y sont soumis.

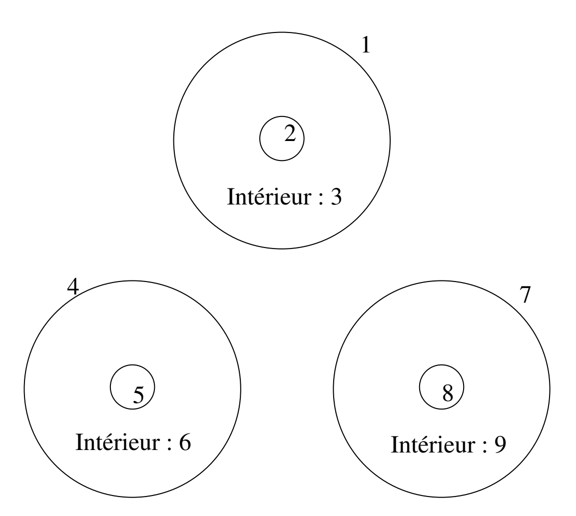


FIG. 9.2 – Mise en place des références

Le maillage réalisé ici comprend 11688 nœuds P_2 et 5688 éléments.

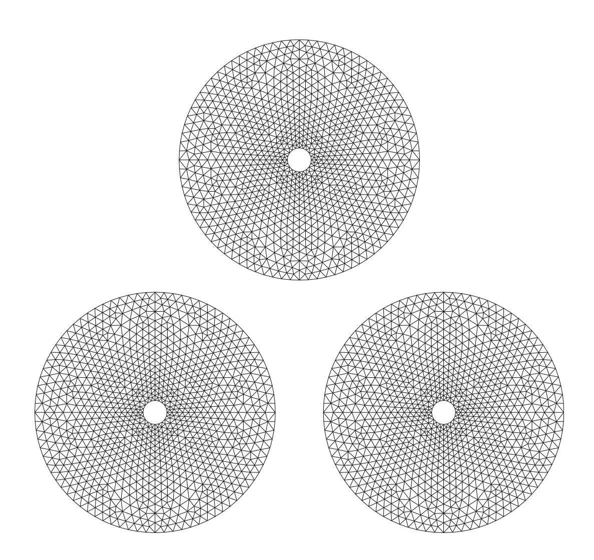


FIG. 9.3 – Maillage

9.1.3 Mise à jour du fichier de paramètres

9.1.3.a Généralités

Nous sommes en dimension 2, il n'y a pas d'axisymétrie et les conditions aux limites seront imposées sur les nœuds du maillage.

```
'DIMENSION DU PROBLEME=' 2
'AXE D AXISYMETRIE (AUCUN,OX,OY)=' 'AUCUN'

'CONDITIONS LIMITES PAR NOEUD OU PAR FACE='  'FACE'
'DEFINITION DES PROPRIETES PHYSIQUES PAR=' 'ELEMENT'
'DEFINITION DES FLUX VOLUMIQUES PAR=' 'ELEMENT'
```

9.1.3.b Gestion du calcul

Le choix du pas de temps : il est à noter que dans le cas présent, nous nous intéressons à un instationnaire (la solution finale étant sans surprise une température uniforme sur les 3 disques !). Le pas de temps ne doit donc pas être trop important s'il l'on souhaite conserver une bonne précision sur les résultats instationnaires. Dans le cas présent, et compte tenu du maillage, il ne faudrait pas excéder un pas de temps de 10 secondes voire 100 secondes.

```
'PAS DE TEMPS SOLIDE='   10.
'NOMBRE DE PAS DE TEMPS SOLIDES=' 100
'SUITE DE CALCUL=' 'NON'
/
```

9.1.3.c Gestion des sorties

```
/ Sorties
/--------
'NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE SOLIDE=' 2
'PAS DES SORTIES CHRONO SOLIDE='    25
'ECRITURE MAILLAGE SOLIDE='     'OUI'
'HISTORIQUES CONDUCTION='            'OUI'
'CHAMP DE TEMPERATURES MAXIMALES='   'NON'

/ Historiques
/ -----------
'HIST' 'FREQ' 100.
'HIST' 'NOEUDS' 1 34 143 4
/
```

Au niveau du listing, on demande un niveau d'impression standard.
En ce qui concerne les fichiers résultat du code, il y aura bien entendu le résultat en fin de calcul, mais on demande ici en plus des résultats tous les 25 pas de temps. Ces résultats seront sortis dans un autre fichier, dit "fichier chronologique" qui pourra également être utilisé par le post-processeur.
Dans la mesure où l'on a demandé des historiques (ici en 6 noeuds du maillage), on disposera également d'un fichier spécifique qui contiendra la température en ces 6 nœuds toutes les 100 secondes (c'est la fréquence qui a été demandée).

9.1.3.d Choix numériques

Les valeurs par défaut sont conservées. On notera que si on choisit un grand pas de temps, il faut généralement augmenter le nombre maximum d'itérations du solveur pour conserver une bonne convergence du calcul.

```
/ Choix numeriques
/-----------------
'NOMBRE ITERATIONS SOLVEUR SOLIDE='   100
'PRECISION POUR LE SOLVEUR SOLIDE=' 1.E-6
```

9.1.3.e Propriétés physiques

Au niveau du maillage, les nœuds ont été référencés. Les propriétés physiques seront donc imposées en fonction des références des nœuds.
La conductivité des matériaux est anisotrope.

```
'ISOTROPIE DU MATERIAU='   3
/
'CPHY'     'RHO'           7700.       -1
'CPHY'     'CP'            460.        -1
/
CPHY'     'K ANISOTROPE'     25. 25. 25.  0. 0.  0.      1
CPHY'     'K ANISOTROPE'     25.  5. 25.  0. 0.  0.      2
CPHY'     'K ANISOTROPE'     25.  5. 25.  0. 0. -45.     3
```

La masse volumique est constante sur tout le domaine. La liste des références est donc réduite à {-1}. C'est le cas également pour la chaleur spécifique.
En revanche, la conductivité est différente suivant les disques :

- disque supérieur : on reproduit un comportement isotrope en fixant une conductivité égale dans les deux directions,
- disque de gauche : on reproduit un comportement orthotrope en imposant une conductivité différente suivant les directions x et y,
- disque de droite : la conductivité est anisotrope, on exprime sa valeur suivant deux directions de l'espace, puis l'angle (en degrés) entre le repère propre et le repère global.

9.1.3.f Conditions initiales

Initialement, la température est de $20°C$ sur tout le domaine (une liste de référence réduite à {-1} indique qu'il s'agit de tous les nœuds du maillage).

```
'CINI'          20.                -1
```

9.1.3.g Conditions limites

Au centre des disques on impose une température de $50°C$ avec un coefficient d'échange de 1000 W/m^2K. A l'extérieur des disques, c'est une condition de flux nul. Cette condition étant celle utilisée par défaut dans SYRTHES, elle ne sera pas spécifiée dans le fichier de données.
Seule la rubrique "Coefficients d'échange" de cette fenêtre sera modifiée.

```
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC COEFFICIENT D ECHANGE' 2 5 8

'CLIM'    'COEF ECH'         50.  1000.       -1
```

On notera que la liste des références est réduite à {-1} dans la mesure où la valeur numérique (h=1000 et T=50) de la condition d'échange est la même pour tous les nœuds soumis à un échange. De façon équivalente, on aurait pu donner la liste complète des références des nœuds avec échange, soit {2 5 8}.

9.1.3.h Fichiers pour le calcul

Cette rubrique va générer le fichier d'environnement *syrthes.env* qui permettra à SYRTHES de connaître les noms des fichiers à utiliser pour le calcul.
On rappelle que ce fichier devra obligatoirement porter ce nom et se trouver aux côtés de l'exécutable *syrthes*.

La première partie de la fenêtre permet de donner les chemins d'accès aux répertoires contenant les fichiers. Ces chemins peuvent être fournis en relatif à partir de la position du fichier d'environnement dans l'arborescence de la machine. Dans notre cas, tous les fichiers sont dans le répertoire courant (./)

```
*
************************************************************************
*           EMPLACEMENT ET NOM DES FICHIERS DU MODULE SYRTHES            *
************************************************************************
*
*
EMPLACEMENT DES FICHIERS DU MODULE SYRTHES
  AMONT : ./
  SUITE : ./
  AVAL :  ./
*
*
NOM DES FICHIERS AMONT POUR SYRTHES
  DONNEES DU CALCUL : syrthes.data
  GEOMETRIE SOLIDE : 3rond2d.des
*
*
NOM DES FICHIERS SUITE POUR SYRTHES
  SUITE SOLIDE RESU : resus1
*
*
NOM DES FICHIERS AVAL POUR SYRTHES
  RESU SYRTHES 1 : geoms
  RESU SYRTHES 2 : resus1
  CHRONO SYRTHES 2 : resusc1
  HISTORIQUE SOLIDE RESULTAT : histos1
```

9.1.4 L'exécution

SYRTHES gère l'espace mémoire de façon dynamique et l'éxécutable *syrthes* peut être utilisé directement si toutes les données du problème ont été fournies dans les fichiers de données.
En revanche, si des sous-programmes utilisateurs ont été utilisés, il est nécessaire de les compiler et de réaliser l'édition des liens afin d'obtenir un nouvel exécutable.
Un utilitaire *link_syrthes* permet de réaliser automatiquement ces opérations.

Le lancement de l'exécution de SYRTHES se fait simplement par la commande

```
syrthes > listing &
```

qui lance le calcul en batch et redirige la sortie standard dans le fichier *listing*.

9.1.5 L'analyse des résultats

L'utilisateur pourra se reporter au chapitre "Méthodologie" pour les premiers conseils concernant l'analyse des résultats. On essaie dans ce paragraphe de repréciser sur cet exemple certaines notions relatives à l'exploitation des calculs.

9.1.5.a Le fichier listing

Parmi les différentes sorties possibles du code, on trouve, soit à l'écran, soit de façon plus raisonnable dans un fichier (si la sortie standard a été redirigée), une compilation d'informations sur le déroulement du calcul.

Une "bonne" attitude lorsque l'exécution d'un calcul est achevée est d'examiner le fichier listing issu du code. Ceci permet d'une part de contrôler que l'on n'a pas fait d'erreurs dans l'entrée des données et d'autre part que celles-ci sont interprétées comme on le souhaite. Enfin le listing permet également d'obtenir un premier aperçu de la façon dont s'est déroulé le calcul.

Quelques éléments de ce fichier sont repris dans ce paragraphe. Pour des raisons de clarté, on sépare les explications en trois blocs. Bien que décrites en plusieurs schémas, on notera que les informations sont présentées dans leur ordre chronologique d'apparition dans le fichier listing.

Le premier bloc s'attache à la restitution d'informations sur les données que l'utilisateur a entré pour la définition de son cas. Le temps investi dans cette analyse est souvent rentable lorsqu'il s'agit d'un premier calcul. En affichant ce type de renseignements, l'objectif est également de donner la possibilité à l'utilisateur, a posteriori (et parfois longtemps après !) de conserver une trace des conditions dans lesquelles son calcul a été effectué.

Cette première partie du listing correspond à la réalisation de toutes les initialisations et des calculs préliminaires.

```
** 30 JUL 2001    16h49:11    **  <------  Date et heure de lancement du calcul

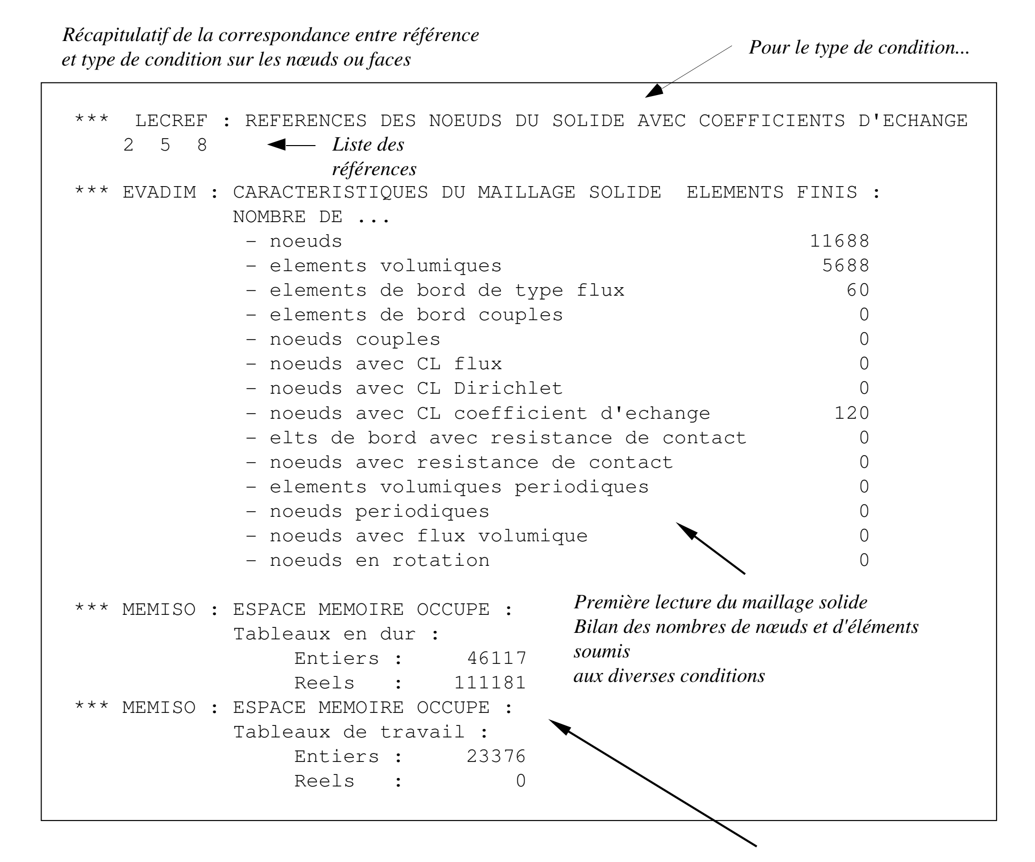
    ****************************************************************
    *                                                              *
    *   SSSSS  YY    YY  RRRRRR  TTTTTTTT HH    HH  EEEEEE   SSSSS *
    *  SS       YY  YY   RR   RR    TT    HH    HH  EE      SS     *
    *  SS        YYYY    RR   RR    TT    HH    HH  EE      SS     *
    *   SSSS      YY     RRRRRR     TT    HHHHHHHH  EEEE     SSSS  *
    *      SS     YY     RR  RR     TT    HH    HH  EE          SS *
    *      SS     YY     RR   RR    TT    HH    HH  EE          SS *
    *  SSSSS      YY     RR   RR    TT    HH    HH  EEEEEE  SSSSS  *
    *                                                              *
    ****************************************************************

                          VERSION 3.3


 **TEMPS D'ENTREE ETAPE D'INITIALISATION : 0.000000  <--  Temps CPU dépensé
*
*********************************************************************
*        EMPLACEMENT ET NOM DES FICHIERS DE SYRTHES                 *
*********************************************************************
*
*
EMPLACEMENT DES FICHIERS POUR SYRTHES
  AMONT : ./
  SUITE : ./
  AVAL :  ./
*
*
NOM DES FICHIERS AMONT POUR SYRTHES
  DONNEES DU CALCUL : syrthes.data
  GEOMETRIE SOLIDE : 3rond2d.des
  DONNEES POUR LE RAYONNEMENT :
  MAILLAGE RAYONNEMENT :
*
*
NOM DES FICHIERS SUITE POUR SYRTHES
  SUITE SOLIDE RESU : resus1
  STOCKAGE DES CORRESPONDANTS :
  FACTEURS DE FORME RAYONNEMENT :
  STOCKAGE DES CORRESPONDANTS RAYONNEMENT :
*
*
NOM DES FICHIERS AVAL POUR SYRTHES
  RESU SYRTHES 1 : 3rond2d_geom
  RESU SYRTHES 2 : 3rond_2d_resu1
  CHRONO SYRTHES 2 : 3rond2d_chrono1
  HISTORIQUE SOLIDE RESULTAT : 3rond2d_histo1
  MAILLAGE PEAU FLUIDE :
  RESULTATS PEAU FLUIDE :
  CHRONO PEAU FLUIDE :
  MAILLAGE DE RAYONNEMENT : ray.geo1
  RESULTATS DE RAYONNEMENT : ray.res1
  CHRONO DE RAYONNEMENT : ray.chro1
  HISTORIQUE RAYONNEMENT : ray.histo1

*
```

FIG. 9.4 – Liste des fichiers utilisés pour le calcul

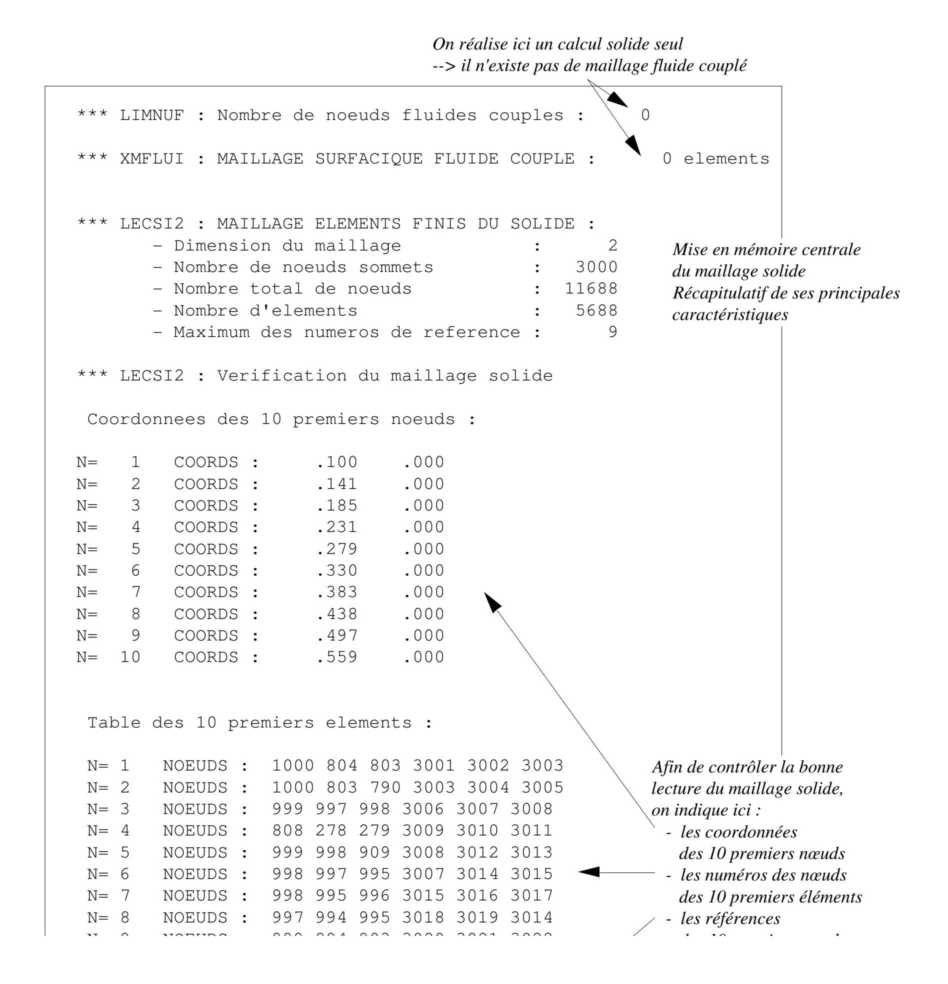


En fonction de la taille du maillage et des conditions à prendre en compte

bilan de l'espace mémoire nécessaire au calcul

Les tableaux "en dur" seront utilisés tout au long du calcul
L'espace occupé par les tableaux "de travail" sera libéré en sortie de cette phase d'initialisation

FIG. 9.5 – Informations géométriques




```
*** LIMNUF : Nombre de noeuds fluides couples :     0

*** XMFLUI : MAILLAGE SURFACIQUE FLUIDE COUPLE :      0 elements


*** LECSI2 : MAILLAGE ELEMENTS FINIS DU SOLIDE :
       - Dimension du maillage            :      2
       - Nombre de noeuds sommets         :   3000
       - Nombre total de noeuds           :  11688
       - Nombre d'elements                :   5688
       - Maximum des numeros de reference :      9

*** LECSI2 : Verification du maillage solide

 Coordonnees des 10 premiers noeuds :

N=   1   COORDS :     .100    .000
N=   2   COORDS :     .141    .000
N=   3   COORDS :     .185    .000
N=   4   COORDS :     .231    .000
N=   5   COORDS :     .279    .000
N=   6   COORDS :     .330    .000
N=   7   COORDS :     .383    .000
N=   8   COORDS :     .438    .000
N=   9   COORDS :     .497    .000
N=  10   COORDS :     .559    .000


 Table des 10 premiers elements :

 N= 1   NOEUDS :  1000 804 803 3001 3002 3003
 N= 2   NOEUDS :  1000 803 790 3003 3004 3005
 N= 3   NOEUDS :  999 997 998 3006 3007 3008
 N= 4   NOEUDS :  808 278 279 3009 3010 3011
 N= 5   NOEUDS :  999 998 909 3008 3012 3013
 N= 6   NOEUDS :  998 997 995 3007 3014 3015
 N= 7   NOEUDS :  998 995 996 3015 3016 3017
 N= 8   NOEUDS :  997 994 995 3018 3019 3014
```

Fig. 9.6 – Informations géométriques

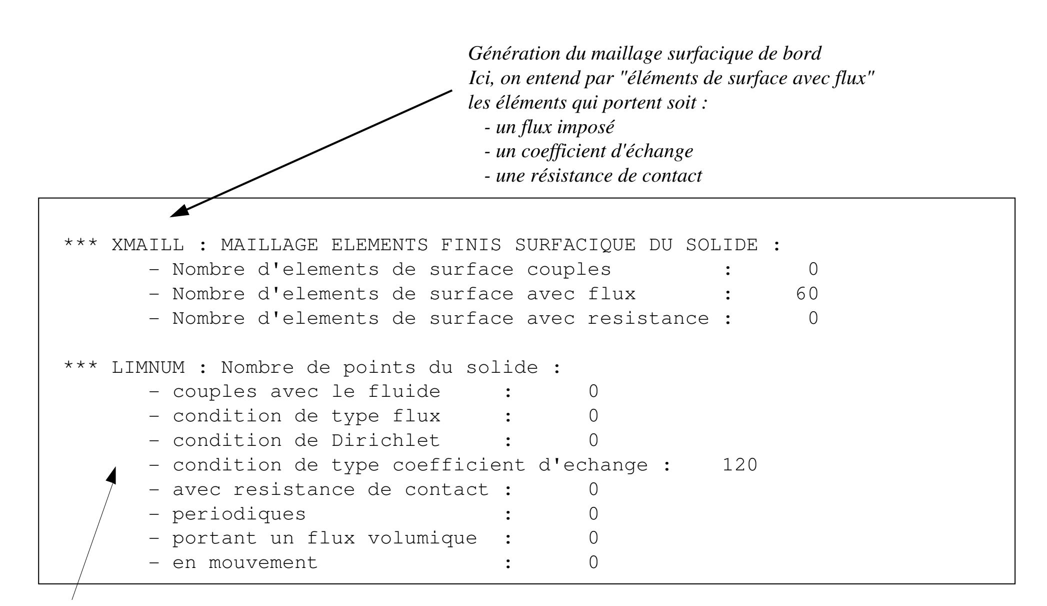


Fig. 9.7 – Conditions aux limites

Lecture des conditions aux limites et conditions physiques dans le fichier de données
(ici "syrthes.data")
A chaque appel d'un mot-clé, on trouve ici l'écho de l'interprétation de Syrthes
Ceci permet entre autres à l'utilisateur :
- de contrôler ses conditions aux limites
- de conserver la trace des conditions qui sont utilisées pour le calcul

```
*** LECLIM : Condition de type coefficient d'echange
             Temperature :   .50000E+02    Coefficient :   .10000E+04
             References :   2  5  8

*** LECLIM : Masse volumique
             Valeur :   .77000E+04    References :  -1

*** LECLIM : Chaleur specifique
             Valeur :   .46000E+03    References :  -1

*** LECLIM : Conductivite anisotrope
             K11,K22,K33 : .25000E+02  .25000E+02  .25000E+02
             TETA X, TETA Y, TETA Z :  .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
             References :   1  2  3

*** LECLIM : Conductivite anisotrope
             K11,K22,K33 :  .25000E+02  .50000E+01  .25000E+02
             TETA X, TETA Y, TETA Z :   .00000E+00  .00000E+00  .00000E+00
             References :   4  5  6

*** LECLIM : Conductivite anisotrope
             K11,K22,K33 :  .25000E+02  .50000E+01  .25000E+02
             TETA X, TETA Y, TETA Z :   .00000E+00  .00000E+00 -.45000E+02
             References :   7  8  9
```

Tous les nœuds ont cette masse volumique

FIG. 9.8 – Conditions du calcul issues du fichier de paramètres

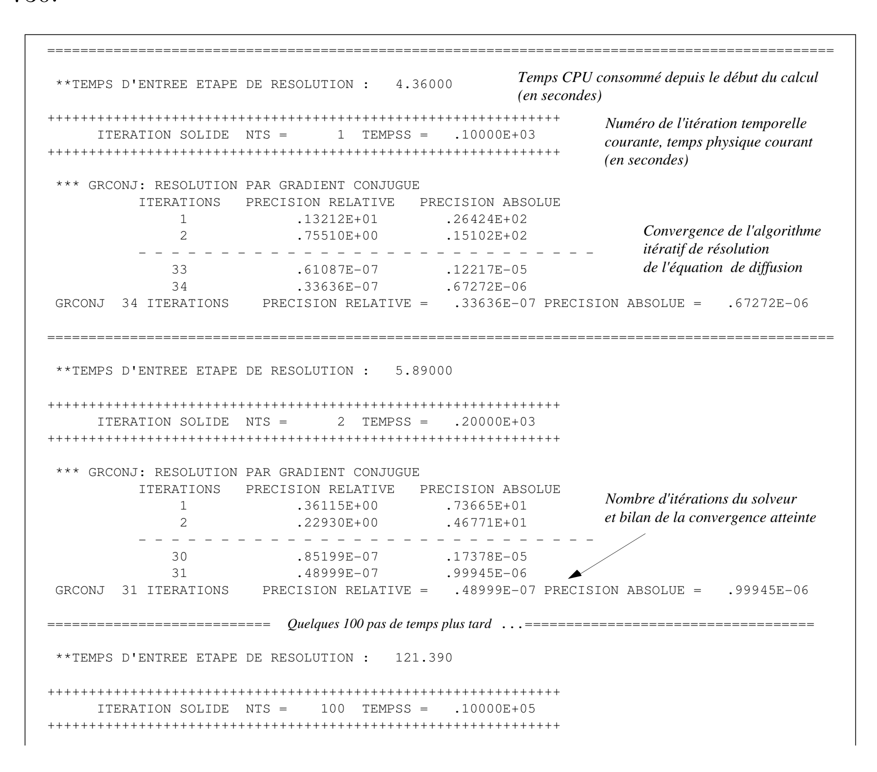
```
*** MEMSOL : ESPACE MEMOIRE OCCUPE
             Tableaux de travail :
                  Entiers :          0
                  Reels   :     167136
```

Enfin, dernière étape des initialisations :
l'évaluation de l'espace mémoire nécessaire à la résolution du problème
Toutes les données caractéristiques sont déjà stockées, seuls des tableaux de travail sont nécessaires

FIG. 9.9 – Mémoire de travail nécessaire à la résolution

Les informations concernant les besoins en mémoire de travail closent la phase d'initialisation du calcul.
On aborde maintenant la résolution proprement dite, dont les caractéristiques (convergence des itérations du solveur) sont affichables à chaque pas de temps. D'un point de vue très général, le présent cas converge bien, puisque le résidu, c'est à dire la norme de l'écart à la solution recherchée diminue à chaque itération effectuée par le gradient conjugué. On remarquera que le nombre d'itérations est de 30 pour une précision atteinte de 10^{-6}. Ce nombre relativement important d'itérations est simplement lié au fait que le pas de temps choisi est assez élevé (100 secondes). Diminuer le pas de temps conduit à des nombres d'itérations nécessaires beaucoup plus faibles.

On présente ci-dessous les affichages obtenus (avec un niveau d'impression égal à 2) aux pas de temps 1, 2 et 100.
On notera pour l'appréciation des temps CPU que le calcul a été réalisé sur station de travail HP 9000-730.



```
==========================================================================================

 **TEMPS D'ENTREE ETAPE DE RESOLUTION :   4.36000

+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
      ITERATION SOLIDE  NTS =       1  TEMPSS =   .10000E+03
+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++

 *** GRCONJ: RESOLUTION PAR GRADIENT CONJUGUE
           ITERATIONS   PRECISION RELATIVE   PRECISION ABSOLUE
                1              .13212E+01        .26424E+02
                2              .75510E+00        .15102E+02
           - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
               33              .61087E-07        .12217E-05
               34              .33636E-07        .67272E-06
 GRCONJ  34 ITERATIONS    PRECISION RELATIVE =   .33636E-07 PRECISION ABSOLUE =   .67272E-06

==========================================================================================

 **TEMPS D'ENTREE ETAPE DE RESOLUTION :   5.89000

+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
      ITERATION SOLIDE  NTS =       2  TEMPSS =   .20000E+03
+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++

 *** GRCONJ: RESOLUTION PAR GRADIENT CONJUGUE
           ITERATIONS   PRECISION RELATIVE   PRECISION ABSOLUE
                1              .36115E+00        .73665E+01
                2              .22930E+00        .46771E+01
           - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - -
               30              .85199E-07        .17378E-05
               31              .48999E-07        .99945E-06
 GRCONJ  31 ITERATIONS    PRECISION RELATIVE =   .48999E-07 PRECISION ABSOLUE =   .99945E-06

===========================  Quelques 100 pas de temps plus tard  . . .===================================

 **TEMPS D'ENTREE ETAPE DE RESOLUTION :   121.390

+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
      ITERATION SOLIDE  NTS =     100  TEMPSS =   .10000E+05
+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
```


Fig. 9.10 – Informations dispensées au cours des pas de temps

Enfin le dernier bloc intéressant à décrire est situé en fin de listing. Il contient des informations statistiques sur le calcul effectué. On trouvera en particulier, la notion de place mémoire requise, ainsi que le coût de l'étape d'initialisation et de la résolution proprement dite.
Un contrôle rapide de la place mémoire effectivement requise peut conduire à diminuer la place mémoire demandée. Cela peut entraîner une meilleure utilisation des ressources informatiques disponibles.

De même, un contrôle rapide du temps calcul utilisé, peut permettre le dimensionnement d'un calcul ultérieur. Un temps anormalement long peut conduire à s'interroger si l'activation de l'optimiseur a bien été effectuée lors de la génération de l'exécutable.

9.1.5.b Le champ de température

A la fin de l'exécution, dans le répertoire où a été effectué le calcul, on dispose des fichiers de résultats suivants :
- le fichier géométrique dont le nom est ici *3rond2d_geom*
- le fichier résultat dont le nom est ici *3rond2d_resu1*
- le fichier chronologique dont le nom est ici *3rond2d_chrono1*
- le fichier historique dont le nom est ici *3rond2d_histo1*

Les couples de fichiers (*3rond2d_geom, 3rond2d_resu1*) et (*3rond2d_geom, 3rond2d_chrono1*) peuvent être utilisés pour les post-processeurs (par exemple EnSight et Rubens). Des utilitaires sont disponibles pour transformer ces fichiers aux formats des post-processeurs (cf. 4.2.2).
Le fichier d'historiques comporte simplement les résultats en colonnes et peut être utilisé directement par de nombreux traceurs de courbes (on citera par exemple *gnuplot* et *xmgr*).

Le champ de température est présenté sur la figure suivante.

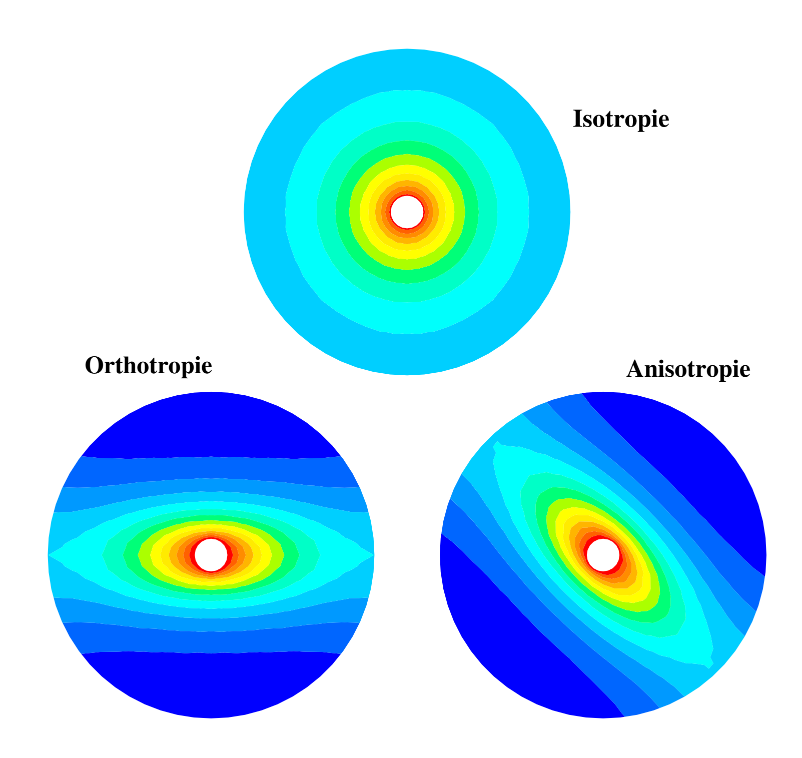


Fig. 9.11 – Champs de température dans les solides à t =50000 s

Il est intéressant de noter la différence de comportement des matériaux reproduite par Syrthes. Les isothermes du disque supérieur sont concentriques alors que les isothermes des autres disques forment des ellipses avant d'être affectés par les conditions de bord. On peut souligner que dans le cas anisotrope, les isothermes sont également des ellipses, mais dont les axes principaux ne sont pas alignés suivant le repère principal.

9.2 Mise en œuvre de la périodicité

9.2.1 Description du cas - Analyse du problème

L'objectif du calcul est la simulation du réchauffement d'une plaque de grande dimension percée d'un grand nombre de trous. Il y a apport de chaleur au niveau des trous sous forme d'une température imposée (passage de tubes perpendiculaires où circule un fluide par exemple).
Les dimensions étant importantes, les trous très nombreux, il est intéressant de considérer cette plaque comme présentant un motif périodique.

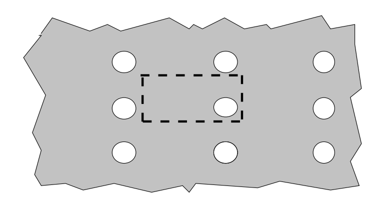


Fig. 9.12 – Détail d'une plaque de grande dimension percée de trous

La réduction du domaine de calcul au motif périodique va permettre de se restreindre à un calcul de petite taille mais fait apparaître la nécessité de prendre en compte une périodicité dans deux directions :

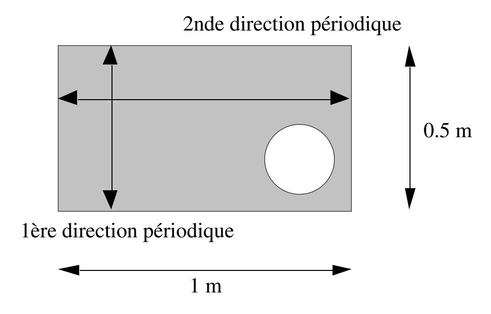


Fig. 9.13 – Domaine de calcul

Si la périodicité verticale et horizontale apparaît assez naturelle, il convient de traiter les coins du domaine avec une attention particulière. Il faut alors bien être conscient du phénomène : la température en un coin du domaine va être influencée par celle qui règne en 3 autres zones du domaine de calcul. Ceci est illustré par la figure ci-dessous qui présente pour le coin en bas à gauche les 3 domaines qu'il faut prendre en considération pour le calcul de la température en ce nœud.

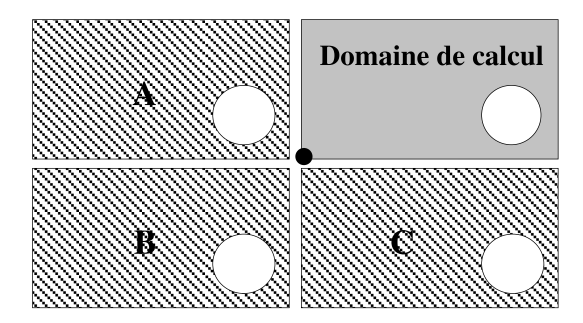


Fig. 9.14 – Domaine de calcul et domaines fictifs à prendre en compte

En d'autres termes, cela revient à dire que dans le cas particulier des coins, il y a périodicité horizontale et verticale mais aussi une périodicité en diagonale :

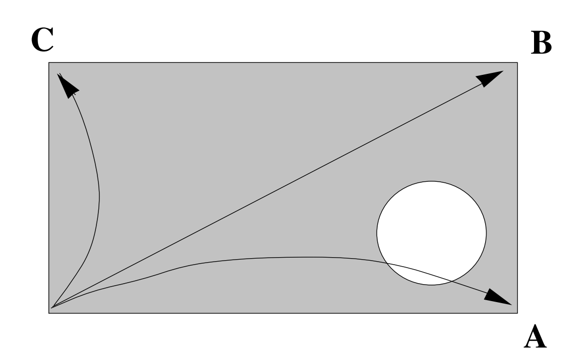


Fig. 9.15 – Cas des coins : périodicité selon 3 directions

9.2.2 Réalisation du maillage

La réalisation du maillage ne pose pas de problèmes particuliers.
Il faut cependant bien garder à l'esprit le phénomène périodique particulier que l'on souhaite traiter lors de la phase d'affectation des références. Le code nécessite la mise en relation des faces périodiques pour la réalisation du calcul : il faut donc bien différencier les différentes arêtes et les différents coins pour pouvoir les mettre correctement en relation par la suite.
Par ailleurs, une référence particulière doit être imposée sur le pourtour du trou pour la mise en place de la condition à la limite.

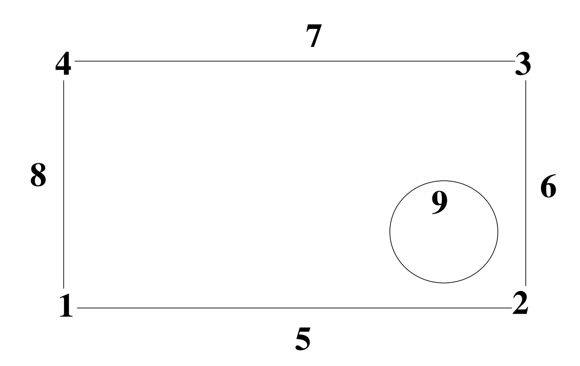


FIG. 9.16 – Références sur les nœuds de bord

Le maillage utilisé pour ce calcul est présenté sur la figure suivante. Il comporte 5788 nœuds P_2 et 2798 éléments.

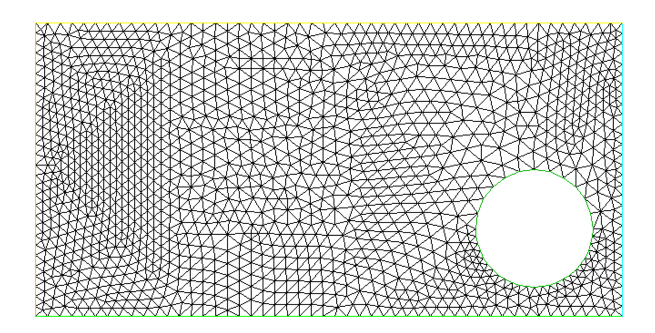


FIG. 9.17 – Maillage

9.2.3 Mise à jour du fichier de paramètres

Au niveau du fichier de paramètres, la spécificité du cas concerne la définition de la périodicité. Les données nécessaires sont regroupées au sein de la fenêtre **Conditions limites**.
Initialement, on trouve dans cette fenêtre une zone destinée à la périodicité :
Dans le cas présent, nous allons utiliser de la périodicité de translation dans 2 directions.
En ce qui concerne la définition des frontières périodiques, on fournit pour chaque périodicité, les références des nœuds qui composent la frontière 1 (Réf_1), les références des nœuds qui composent la frontière 2 (Réf_2), et la translation qui permet d'aller de la frontière 1 vers la frontière 2.
Enfin, on n'oubliera pas que la prise en compte de la périodicité dans les 2 directions induit des transmissions d'informations suivant les diagonales du domaine.

```
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES PERIODIQUES' 1 8 4 7 3 6 2 5

'CLIM'    'PERIODICITE'  'T'   1.  0.  0.   1 8 4   -1  2 6 3
'CLIM'    'PERIODICITE'  'T'   0.  0.5 0.   1 5 2   -1  7 3 4
'CLIM'    'PERIODICITE'  'T'   1.  0.5 0.       1   -1  3
'CLIM'    'PERIODICITE'  'T'   1. -0.5 0.       4   -1  2
```

Pour compléter les conditions aux limites du calcul, on définit une température imposée sur le bord du trou de la plaque :

```
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES AVEC DIRICHLET'   9

'CLIM'    'DIRICHLET'      50     9
```

9.2.4 Les résultats

On pourrait de la même façon que pour le cas *3rond2d* reprendre le listing issu du calcul. On engage les lecteurs à se reporter au cas précédent. Il faut simplement signaler que diverses informations relatives à la périodicité seront alors remplies. D'un point de vue informatique, la prise en compte de la périodicité ne pénalise que peu le coût du calcul.

La figure suivante illustre le champ de température dans la pièce solide après 1200 secondes.

De façon à bien illustrer le caractère périodique de la solution obtenue, le domaine simulé a été reproduit 9 fois. On note la parfaite continuité du champ de température entre les domaines qui illustre le fait que le caractère périodique (dans deux directions pour ce cas) est bien simulé.

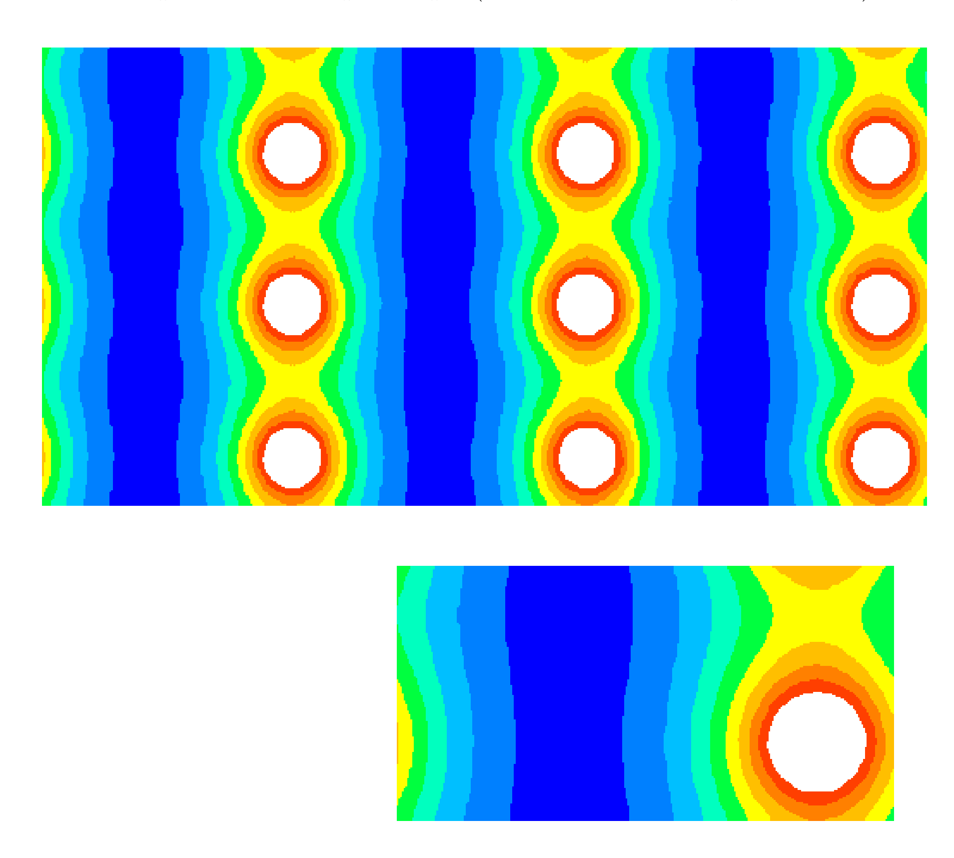


FIG. 9.18 – Champ de température à t = 12000 s

9.3 Prise en compte de résistances de contact

9.3.1 Description du cas - Analyse du problème

On se propose ici d'illustrer la prise en compte de résistances de contact dans le cas d'une plaque qui présente une fissure. La plaque est initialement à une température uniforme de 20°C et on souhaite étudier le transitoire thermique lorsque le haut de la plaque est soumis à une température de 50°C et que le bas est maintenu à 20 °C. Le matériau est de l'acier, la température initiale de

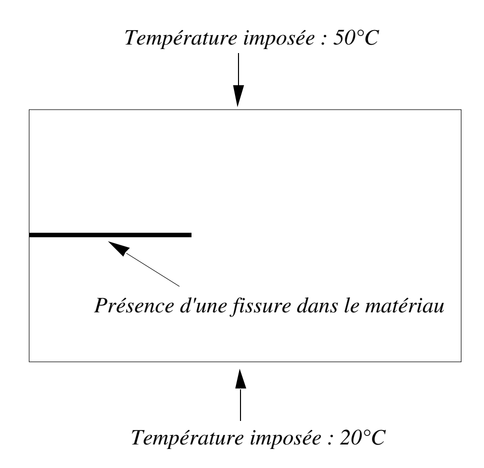


Fig. 9.19 – Schéma de la plaque

la plaque est de 20°C et la résistance de contact est fixée à 100 $W/m^2/K$.

9.3.2 Réalisation du maillage

L'utilisation des résistances de contact nécessite un maillage quelque peu particulier dans la mesure où il est nécessaire de faire apparaître cette "fissure" au niveau du maillage : de part et d'autre de la faille, on a des nœuds différents mais qui sont géométriquement confondus.
En étirant artificiellement le maillage de part et d'autre de la fissure, on ferait apparaître le maillage suivant :

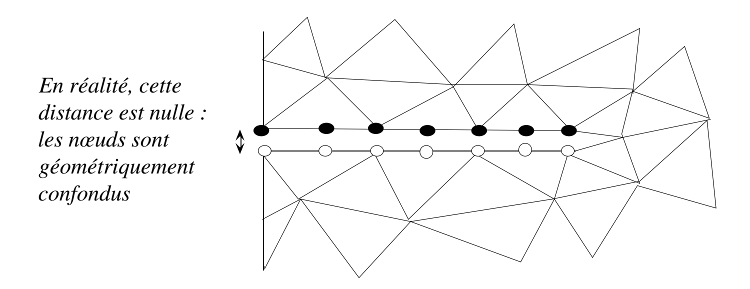


Fig. 9.20 – Zoom sur le maillage de la fissure

On notera que les couples de nœuds (•,∘) coïncident obligatoirement : les 2 nœuds possèdent des numéros différents, interviennent de façon indépendante dans la connectivité mais possèdent exactement les mêmes coordonnées.

Par ailleurs les nœuds • et ∘ doivent porter des références différentes puisque l'utilisateur devra indiquer au code qu'ils ne sont en réalité séparés que par une résistance de contact. Les références utilisées sont présentées ci-dessous :

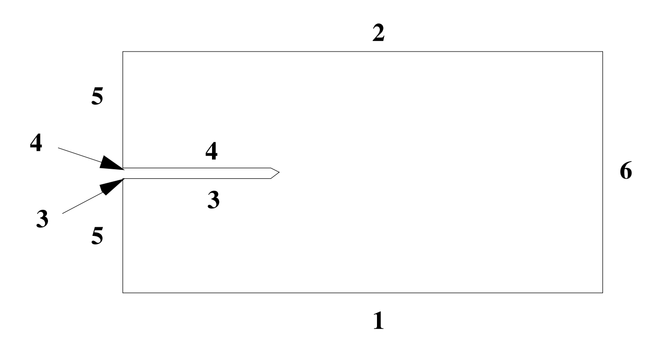


Fig. 9.21 – Références sur le domaine

Le maillage comporte 4887 nœuds P_2 et 2798 éléments ; il est présenté ci dessous.

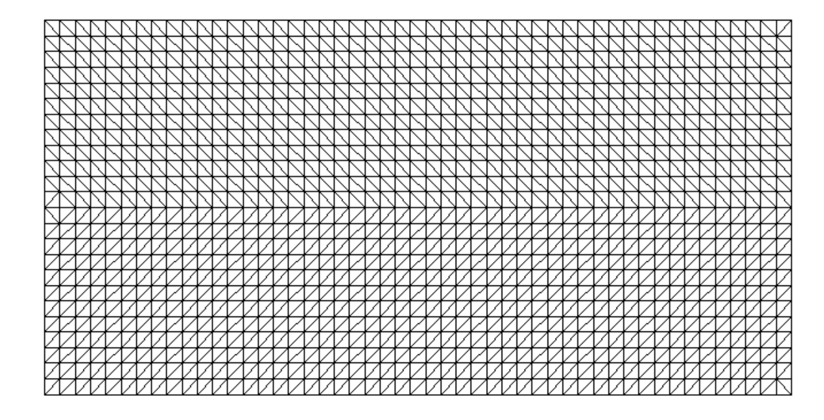


Fig. 9.22 – Maillage

9.3.3 Mise à jour du fichier de paramètres

Au niveau des paramètres du calcul, les résistances de contact sont considérées comme de simples conditions aux limites.
Il faut simplement donner les références des nœuds soumis à une résistance de contact et la valeur de cette dernière.
Ces données sont fournies dans la fenêtre "Conditions limites".

```
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC RESISTANCE DE CONTACT'  3 4

'CLIM'     'RES CONTACT'     100    3 4
```

Les conditions aux limites sont complétées par les températures imposées sur les parois inférieure et supérieure du domaine.

```
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES AVEC DIRICHLET'   1 2

'CLIM'    'DIRICHLET'      20    1
'CLIM'    'DIRICHLET'      50    2
```

9.3.4 Les résultats

On présente ci-dessous le champ de température à différents instants.
Il est intéressant de souligner la discontinuité de température au niveau de la fissure. A convergence la discontinuité de température subsiste ; par contre le flux reste bien sûr une quantité continue.

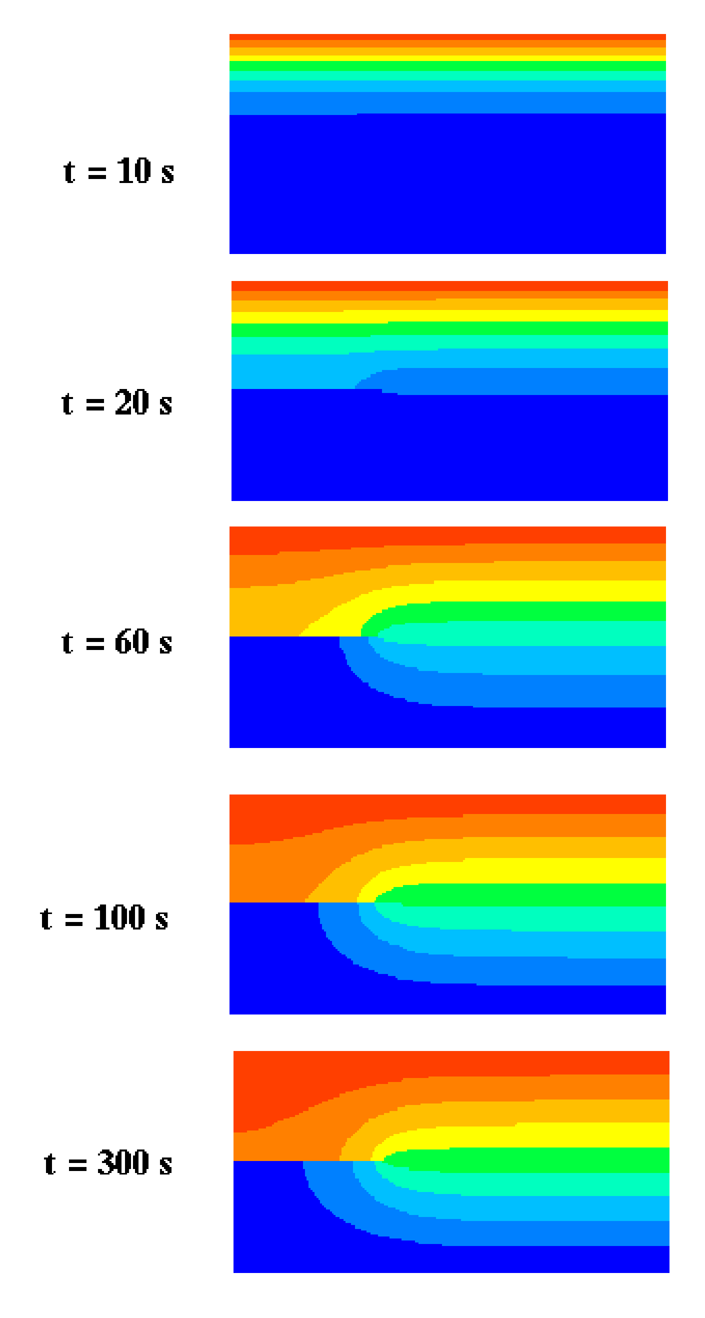


FIG. 9.23 – Champs de température à différents instants

9.4 Mise en œuvre du rayonnement thermique

3rond_2d_ray

9.4.1 Description du cas - Analyse du problème

On reprend ici le cas des 3 disques non connexes possédant chacun une conductivité (anisotrope) différente. Le domaine de calcul a été enrichi et les 3 disques sont maintenant disposés dans une enceinte.

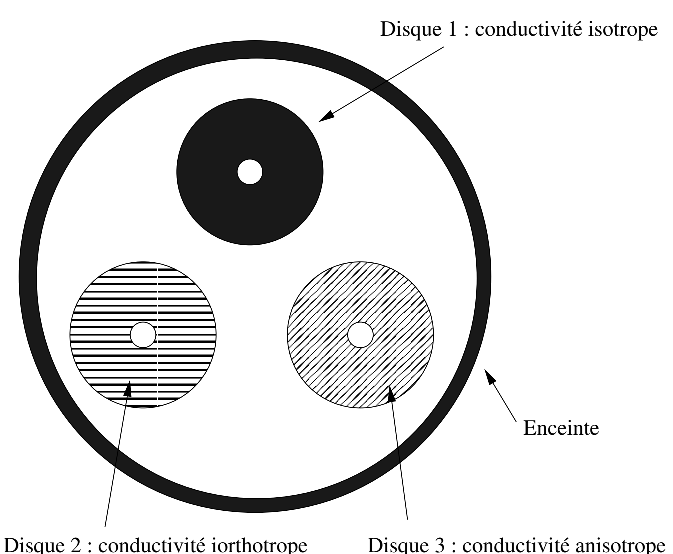


Fig. 9.24 – Schéma du problème

- Disque 1 : on impose une conductivité égale dans les directions x et y (25 W/mK) ;
- Disque 2 : la conductivité est de 25 W/mK dans la direction x, et 5 W/mK dans la direction y.
- Disque 3 : la conductivité est de 25 W/mK et 5 W/mK suivant les deux axes d'un repère local ; ce repère faisant un angle de 45° par rapport au repère de référence.
- Enceinte : on impose une conductivité égale dans les directions x et y (25 W/mK) ;

La masse volumique et la chaleur spécifique sont considérées identiques pour les 3 disques et l'enceinte : $\rho = 7700\ kg/m^3$ et $C_p = 460\ J/kgK$.

En ce qui concerne l'émissivité, elle est considérée identique pour toutes les pièces et égale à 0.95 sur tout le spectre.

9.4.2 Réalisation des maillages

Le calcul faisant intervenir les transferts thermiques par conduction et rayonnement, deux maillages doivent être créés. Le premier, de dimension 2, sera utilisé pour le calcul conductif et le second (de dimension 1), par le calcul radiatif. Si la géométrie de ce cas est très simple et ne pose aucun problème d'un point de vue maillage, il est cependant nécessaire de disposer soigneusement

des références différentes sur les diverses parties du domaine. En effet, la présence simultanée de matériaux ayant des conductivités différentes implique la nécessité de les distinguer par des références différentes. On prendra également soin de différencier les bords pour l'application des conditions aux limites.

9.4.2.a Le maillage pour la conduction

Nous sommes en dimension 2, le maillage de conduction est composé de triangles à 6 nœuds. Nous avons cette fois choisi de donner des références différentes aux éléments du maillage pour différencier les divers matériaux. 4 numéros (de sous-domaine) différents sont utilisés : un pour chacun des disques et un pour l'enceinte.
Nous avons également besoin de numéros de références (ici sur les arêtes de bord) pour différencier les conditions aux limites (coefficient d'échange et couplage avec le rayonnement).

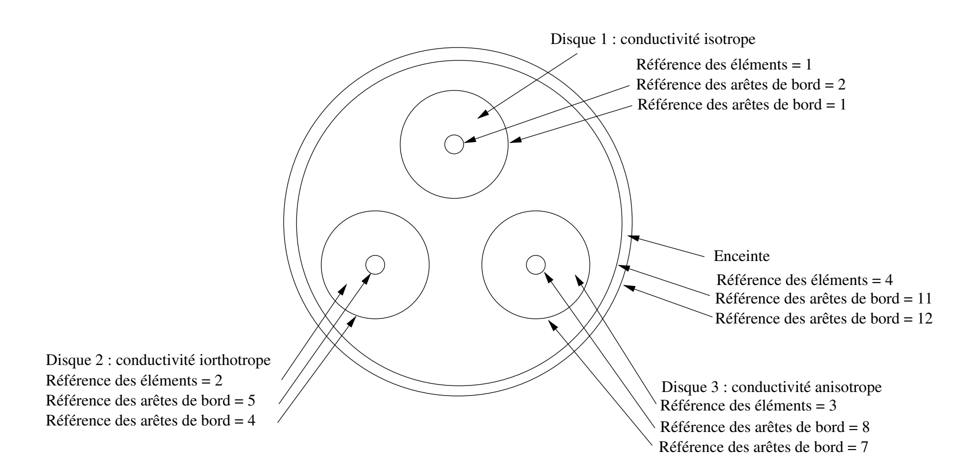


FIG. 9.25 – Mise en place des références

Le maillage réalisé ici comprend 6504 nœuds P_2 et 3072 éléments.

9.4.2.b Le maillage pour le rayonnement

Nous sommes en dimension 2, le maillage est composé de segments à 2 nœuds.
Nous allons prendre en compte les transferts radiatifs entre les disque et l'enceinte. Le maillage sera donc constitué de la géométrie de bord extérieur des disques et de la géométrie de bord intérieur de l'enceinte.
Au niveau des références des éléments, les propriétés radiatives étant identiques partout et le cas ne nécessitant pas de conditions à la limite particulière sur le maillage de rayonnement, il est possible d'utiliser la même référence partout.
Nous avons choisi la référence 1.

Le maillage réalisé ici comprend 240 nœuds P_1 et 240 éléments (segments à 2 nœuds).

9.4.3 Mise à jour du fichier de paramètres

Nous allons examiner les rubriques spécifiques au calcul du rayonnement thermique et au couplage conduction/rayonnement.

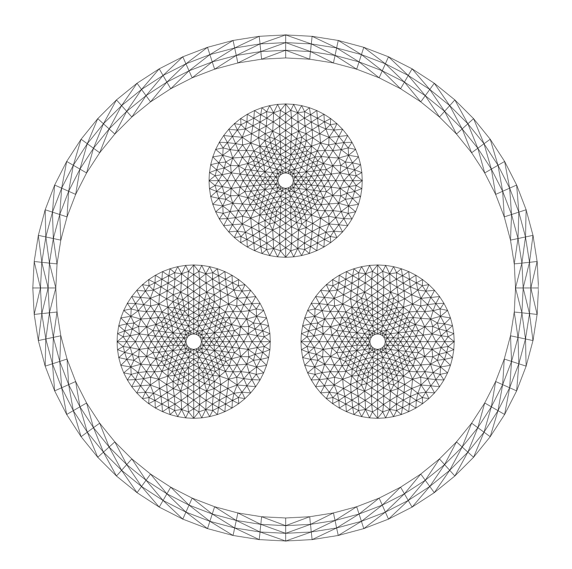


FIG. 9.26 – Maillage pour la conduction

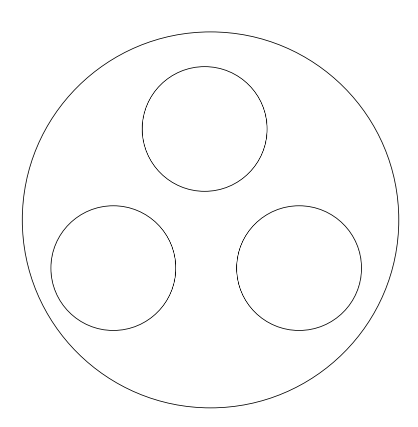


FIG. 9.27 – Maillage pour le rayonnement

9.4.3.a Rayonnement

La première étape consiste à définir un point intérieur à chaque volume connexe. On rappelle que ces points permettent à SYRTHES de distinguer l'intérieur de l'extérieur (dans la mesure où les maillages surfaciques ne sont pas orientés). Ici le calcul du rayonnement se fera dans l'enceinte uniquement (on le néglige au niveau des trous des disques), il n'y a par conséquent qu'un seul volume connexe.
Le domaine de calcul ne présente ni symétrie, ni périodicité ; c'est un domaine fermé.

```
'PERIODICITE DE ROTATION POUR LE RAYONNEMENT='  'NON'
'NOMBRE DE PLANS DE SYMETRIE POUR LE RAYONNEMENT=' 0
'DOMAINE DE RAYONNEMENT CONFINE OUVERT SUR L EXTERIEUR=' 'NON'

'RAYT'   'VOLUME CONNEXE'    -2.  -0.5  0.
```

On définit ensuite les grandeurs physiques. Ici, on ne considère qu'une seule bande spectrale, et l'émissivité est identique pour toutes les pièces.

```
'NOMBRE DE BANDES SPECTRALES POUR LE RAYONNEMENT=' 1

'RAYT'  'BANDES SPECTRALES'     1     1.e-10      10.

'RAYT'  'EMISSIVITE PAR BANDE'  1     0.95       -1
```

9.4.3.b Conditions limites rayonnement

Dans notre cas, toutes les zones où l'on effectue un calcul de rayonnement sont des parois maillées et pour lesquelles on effectue un calcul de conduction. Il n'y a ainsi pas de condition à la limite à appliquer directement sur le maillage de rayonnement. Toutes les zones de rayonnement seront couplées avec le calcul de conduction (voir plus loin).

9.4.3.c Entrées/sorties rayonnement

On conserve ici les options proposées par défaut.
On remarquera que dans un petit cas comme celui-ci le calcul des facteurs de forme comme des correspondances entre conduction et rayonnement est instantané et qu'il n'est en réalité pas indispensable de sauvegarder ces données dans un fichier.

```
'NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE RAYONNEMENT=' 2
/
'NOMBRE DE REDECOUPAGES POUR CALCUL DES FACTEURS DE FORME=' 0
/
'STOCKAGE DES FACTEURS DE FORME SUR FICHIER=' 'NON'
'LECTURE DES FACTEURS DE FORME SUR FICHIER='  'NON'
/
'STOCKAGE DES CORRESPONDANTS POUR RAYONNEMENT='  'NON'
'LECTURE DES CORRESPONDANTS POUR RAYONNEMENT='  'NON'
```

9.4.3.d Fichiers pour le calcul

```
*
**********************************************************************
*           EMPLACEMENT ET NOM DES FICHIERS DE SYRTHES               *
**********************************************************************
*
*
EMPLACEMENT DES FICHIERS POUR SYRTHES
  AMONT : ./
  SUITE : ./
  AVAL :  ./
*
*
NOM DES FICHIERS AMONT POUR SYRTHES
  DONNEES DU CALCUL : syrthes.data
  GEOMETRIE SOLIDE : 3rond2Dray.des
  DONNEES POUR LE RAYONNEMENT :  syrthes.ray
  MAILLAGE RAYONNEMENT : 3rond2D_r.des
*
```

```
*
NOM DES FICHIERS SUITE POUR SYRTHES
  SUITE SOLIDE RESU : resus1
*
*
NOM DES FICHIERS AVAL POUR SYRTHES
  RESU SYRTHES 1 : geoms
  RESU SYRTHES 2 : resus1
  CHRONO SYRTHES 2 : resusc1
  HISTORIQUE SOLIDE RESULTAT : histos1
  MAILLAGE DE RAYONNEMENT : ray.geo1
  RESULTATS DE RAYONNEMENT : ray.res1
  CHRONO DE RAYONNEMENT : ray.chro1
*
```

9.4.4 Couplages

Cette rubrique est destinée à la définition du couplage des phénomènes de conduction et de rayonnement.
On fournit successivement :
- sur le maillage de conduction : la liste des références des faces qui sont couplées avec le rayonnement,
- sur le maillage de conduction : la liste des références des faces qui sont couplées avec la conduction.

Remarque :
On parle ici de références de **faces** *car c'est le choix qui a été fait antérieurement dans la rubrique "Conditions Limites"*

```
/ References sur le solide
/ ------------------------
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC RAYONNEMENT CONFINE' 1 4 7 11
/
/ References sur le maillage de rayonnement
/ ------------------------------------------
'RAYONNEMENT : REFERENCES FACES COUPLEES AU SOLIDE'  1
```

9.4.5 Les résultats

9.4.5.a Le fichier listing

Parmi les différentes sorties possibles du code, on trouve, soit à l'écran, soit de façon plus raisonnable dans un fichier (si la sortie standard a été redirigée), une compilation d'informations sur le déroulement du calcul.

Nous rappelons qu'une "bonne" attitude lorsque l'exécution d'un calcul est achevée est d'examiner le fichier listing issu du code. Ceci permet d'une part de contrôler que l'on n'a pas fait d'erreur dans l'entrée des données et d'autre part que celles-ci sont interprétées comme on le souhaite. Enfin le listing permet également d'obtenir un premier aperçu de la façon dont s'est déroulé le calcul.

On ne reprendra pas ici tout le fichier listing (se reporter au cas *3rond2d*) mais on se propose de présenter les spécificités induites par l'activation du calcul du rayonnement.

On trouve tout d'abord dans le fichier, un récapitulatif des conditions imposées sur les maillages.

```
*** LECREF : REFERENCES DES NOEUDS DU SOLIDE AVEC COEFFICIENTS D'ECHANGE
    2   5   8

*** LECRER : REFERENCES DES NOEUDS DU SOLIDE AVEC RAYONNEMENT CONFINE
    1   4   7 11

*** LECRER : MAILLAGE RAYONNEMENT
             REFERENCES DES FACES COUPLEES AU SOLIDE
    1

*** EVADIM : CARACTERISTIQUES DU MAILLAGE SOLIDE  ELEMENTS FINIS :
             NOMBRE DE ...
              - noeuds                                     6504
              - elements volumiques                        3072
              - elements de bord de type flux               300
              - faces couplees                                0
              - noeuds couples                                0
              - faces avec CL flux                            0
              - noeuds avec CL Dirichlet                      0
              - faces avec CL coefficient d'echange          60
              - faces avec resistance de contact              0
              - noeuds avec resistance de contact             0
              - elements volumiques periodiques               0
              - noeuds periodiques                            0
              - elements surfaciques avec rayt confine      240
              - noeuds avec rayonnement confine             480
              - faces avec rayonnement infini                 0
              - noeuds en rotation                            0
              - elements avec flux volumique                  0

*** EVADIM : CARACTERISTIQUES DU MAILLAGE DE  RAYONNEMENT :
             NOMBRE DE ...
              - maillage rayonnement - nombre de noeuds     240
              - maillage rayonnement - nombre d'elements    240
              - facettes couplees avec le solide            240
              - facettes couplees avec le fluide              0
              - facettes a temperature imposee                0
              - facettes a flux impose                        0
              - facettes de type paroi equivalente            0
              - facettes de type milieu semi transparent      0
              - noeuds couples avec le solide               240
              - noeuds couples avec le fluide                 0
```

Fig. 9.28 – Analyse de la correspondance entre références et types de conditions

Ensuite, les information géométriques concernant le maillage pour la conduction sont enrichies des données relatives au couplage avec le rayonnement.

```
*** XMAILL : MAILLAGE ELEMENTS FINIS SURFACIQUE DU SOLIDE :
       - Nombre d'elements de surface couples          :      0
       - Nombre d'elements de surface avec flux        :    300
       - Nombre d'elements de surface avec resistance :      0
       - Nombre d'elements de surface avec rayonnement:    240

*** LIMFNU : Solide, nombre de ...:
       - noeuds couples avec le fluide                           0
       - faces couplees avec le fluide                           0
       - faces avec condition de type flux                       0
       - noeuds avec condition de Dirichlet                      0
       - faces avec condition de type coefficient d'echange     60
       - noeuds avec rayonnement confine                       480
       - faces avec rayonnement confine                        240
       - faces avec rayonnement infini                           0
       - faces avec resistance de contact                        0
       - noeuds avec resistance de contact                       0
       - noeuds periodiques                                      0
       - noeuds en mouvement                                     0
```

Fig. 9.29 – Informations géométriques sur le maillage conduction

Puis, comme pour le maillage de conduction, on trouve un récapitulatif du maillage de rayonnement avec notamment les listes des 10 premiers nœuds, des 10 premiers éléments et les numéros de références des 10 premiers éléments.

Puis, Syrthes donne un certain nombre d'informations sur les conditions aux limites utilisées sur le maillage de rayonnement.

```
*** LNRAY2 : MAILLAGE RAYONNEMENT
       - Nombre de noeuds couples avec le solide :    240
       - Nombre de noeuds couples avec le fluide :      0


*** LFRAY2 : MAILLAGE RAYONNEMENT
       - Nombre de faces couplees au solide     :              240
       - Nombre de faces a temperature imposees :                0
       - Nombre de faces a flux impose :                         0
       - Nombre de faces paroi equivalente couplees au fluide :  0
       - Nombre de faces paroi equivalente isolee :              0
       - Nombre de faces milieu semi-transparent solide :        0
```

Fig. 9.30 – Conditions aux limites sur le maillage de rayonnement

```
*** LECLIR : Rayonnement : composante connexe
             Point interieur :  -.20000E+01 -.50000E+00  .10000E-01
*** LECLIR : Definition de la bande spectrale  1
             Limites de la bande :  .10000E-09  .10000E+02
*** LECLIR : emissivite de la bande spectrale  1
             Emisivite  :  .95000E+00
             References :  -1
*** LECLIR : Nombre d'historiques sur les facettes :      3
             Liste des facettes :
      1     33     44

*** CONNEX_2D : Le maillage surfacique contient 4 surfaces connexes et 1 volumes connexes

*** ORIENE_2D : Le nombre de facettes reorientees est : 120

*** DIMENSION_2D : Dimensions caracteristiques :
                     encombrement    = 6.000000
                     + petit segment = 0.209057

*** FACECACHE_2D : Le maillage comporte des faces cachees (nbre=21496)
                   20.00 % du calcul effectue
                   40.00 % du calcul effectue
                   60.00 % du calcul effectue
                   80.00 % du calcul effectue

*** SMOOGC: SMOOTHING PAR GRADIENT CONJUGUE
          ITERATIONS   PRECISION RELATIVE   PRECISION ABSOLUE
SMOOGC  26 ITERATIONS    PRECISION RELATIVE =   .54275E-02 PRECISION ABSOLUE =   .35035E-09
```

Rappel des conditions physiques pour le rayonnement

Recherche des surfaces connexes et orientation du maillage

Calcul des facteurs de forme

Fig. 9.31 – Calculs préliminaires pour le rayonnement

Après cette phase d'initialisation, on passe à la résolution proprement dite du problème.
Chaque pas de temps est décomposé en une phase de résolution du rayonnement puis une phase de résolution de la conduction.

```
++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
ITERATION SOLIDE  NTSYR =      1   TEMPSS =  1.00000e+03
++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++


**TEMPS D'ENTREE RAYONNEMENT : 5.220000
    ========================================
    RESOLUTION DU SYSTEME LIE AU RAYONNEMENT
    ========================================


*** GAUSEI :  Traitement de la bande spectrale :  1

*** RRAYRC: RESOLUTION DU RAYONNEMENT
          ITERATIONS   PRECISION RELATIVE   PRECISION ABSOLUE
RRAYRC   6 ITERATIONS    PRECISION RELATIVE =   .12801E-10 PRECISION ABSOLUE =   .92316E-09
**TEMPS D'ENTREE ETAPE DE RESOLUTION DE LA CONDUCTION : 5.490000

*** GRCONJ: RESOLUTION PAR GRADIENT CONJUGUE
          ITERATIONS   PRECISION RELATIVE   PRECISION ABSOLUE
              25            .14182E-02         .28364E-01
              50            .21384E-06         .42768E-05
              75            .36638E-10         .73275E-09
GRCONJ  75 ITERATIONS    PRECISION RELATIVE =   .36638E-10 PRECISION ABSOLUE =   .73275E-09
```

Résolution du rayonnement

Résolution de la conduction

Fig. 9.32 – Informations dispensées au cours des pas de temps

En fin de calcul, Syrthes fournit des informations statistiques sur le calcul effectué. On trouvera en particulier, la notion de place mémoire requise, ainsi que le coût de l'étape d'initialisation et de la résolution proprement dite, pour la conduction d'une part et pour le rayonnement d'autre part. Le calcul a été ici réalisé sur station HP9000 ; le pas de temps était de 1000 secondes.

```
================================================
              SYRTHES : BILAN DU CALCUL

         CONDUCTION :         50 PAS DE TEMPS
                            6504       NOEUDS
                            3072     ELEMENTS
        RAYONNEMENT :         50 PAS DE TEMPS
                             240     FACETTES
================================================



TEMPS CPU (secondes)
=========

PHASE INITIALE POUR LA CONDUCTION . . . . . . . .        2.5600
RESOLUTION DE LA CONDUCTION . . . . . . . . . . .       43.1100
PHASE INITIALE POUR LE RAYONNEMENT. . . . . . . .        2.6600
RESOLUTION DU RAYONNEMENT . . . . . . . . . . . .       14.8900
T E M P S   T O T A L   . . . . . . . . . . . . .       63.2200
D U R E E S M O Y E N N E S
   - RESOLUTION DE LA CONDUCTION
                        par pas de temps  . .      0.8622
       par pas de temps pour 1000 noeuds  . .      0.1326
   - RESOLUTION DU RAYONNEMENT
                        par pas de temps  . .      0.2978
            par pas de temps par facette  . .      0.0012
```

Fig. 9.33 – Bilan en fin de calcul

9.4.5.b Le champ de température

La figure ci-dessous présente le champ de température après 14 heures.

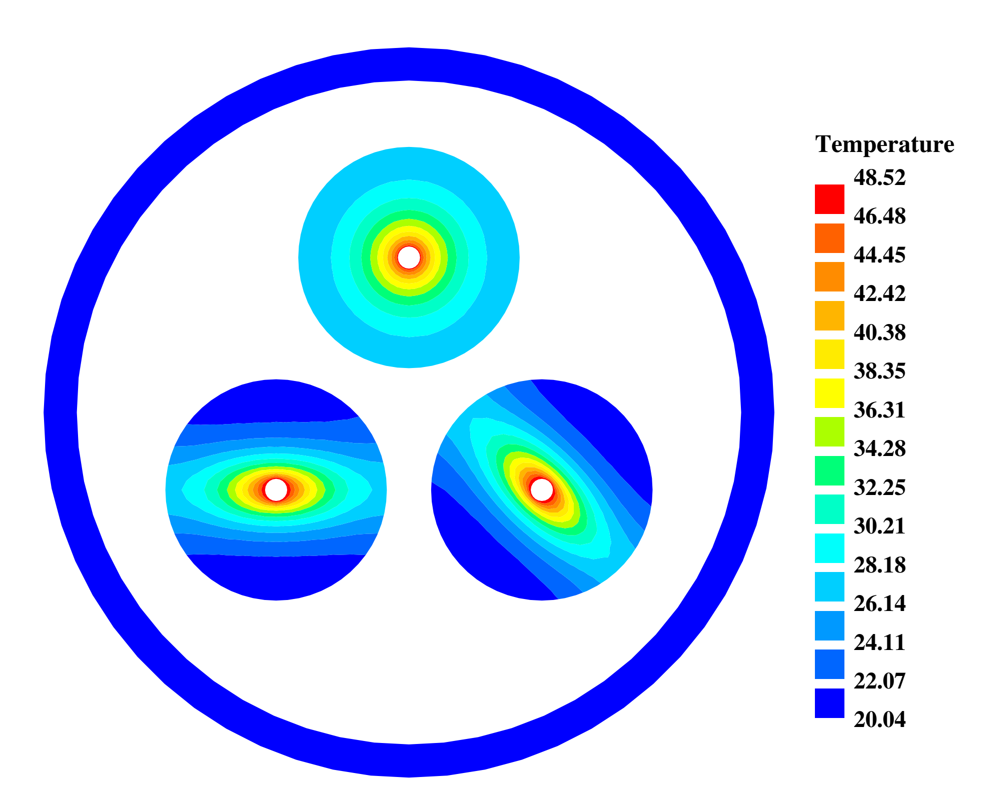


FIG. 9.34 – Champs de température dans les solides à t = 14 heures

A nouveau, on peut voir la différence de comportement des matériaux reproduite par le module SYRTHES. Les isothermes du disque supérieur sont concentriques alors que les isothermes des autres disques forment des ellipses avant d'être affectés par les conditions de bord. On peut souligner que dans le cas anisotrope, les isothermes sont également des ellipses, mais dont les axes principaux ne sont pas alignés suivant le repère principal.

Compte tenu de l'échelle linéaire employée, il est difficile de voir sur la figure précédente le réchauffement de l'enceinte par rayonnement. La figure suivante utilise une échelle adaptée à la température de l'enceinte.

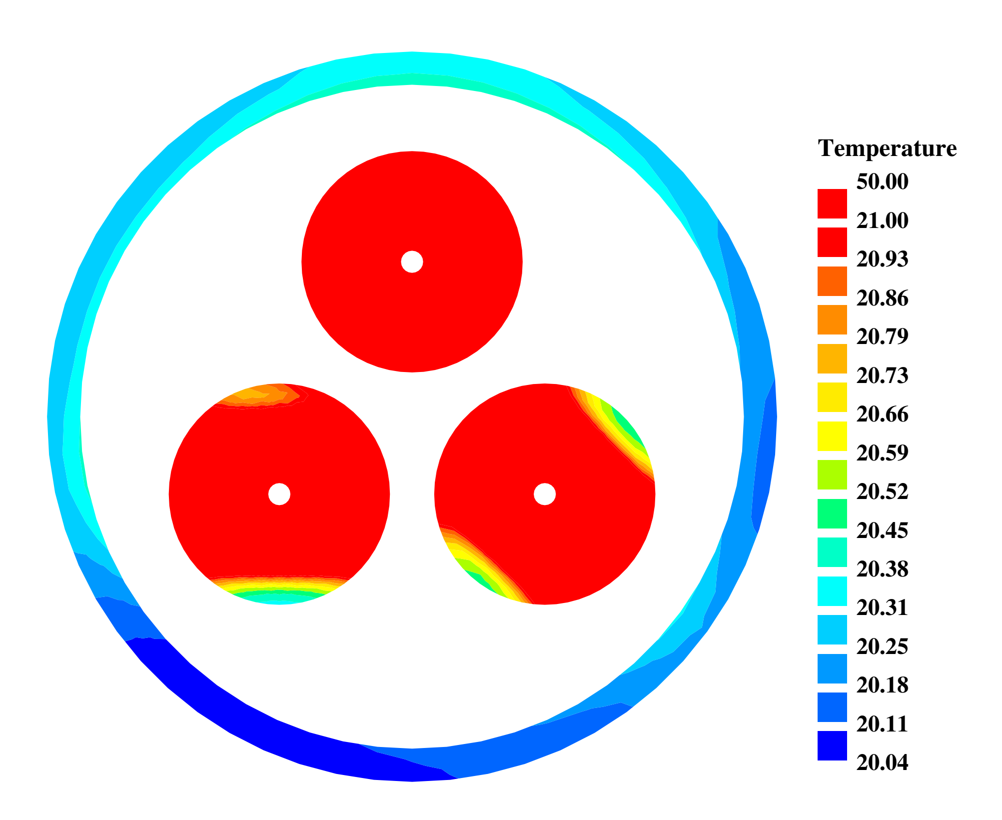


FIG. 9.35 – Champs de température dans les solides à t = 14 heures

Conclusion 10

Aujourd'hui, SYRTHES permet de traiter des problèmes complexes faisant intervenir simultanément les phénomènes de conduction, de rayonnement et, dans sa version couplée avec un code de thermohydraulique, de convection.
Au fur et à mesure que l'on intègre de plus en plus de phénomènes dans la simulation, on peut espérer obtenir des résultats de plus en plus précis. Cependant, les calculs deviennent plus délicats à mener puisqu'il faut appréhender des phénomènes physiques très différents évoluant sur des échelles de temps elles aussi très différentes.

Le document présente les éléments indispensables à la mise en œuvre du code SYRTHES 3.4. On a cherché, au sein de SYRTHES, à découpler la mise en œuvre du rayonnement le plus possible pour ne pas pénaliser les utilisateurs lors de la mise en œuvre du code pour des calculs de conduction uniquement. De plus, cela permet facilement de réaliser un calcul prenant en compte le rayonnement et un calcul ne prenant pas en compte cet aspect. Il suffit en fait d'activer et de ne pas activer le rayonnement confiné.

Ce manuel présente également l'utilisation du code dans le cadre d'un couplage avec le code de thermohydraulique *Code_Saturne*.
Les utilisateurs du code fluide disposent alors d'un outil complet et performant permettant la modélisation des systèmes complexes faisant intervenir les couplages thermiques entre fluide et solide.
Le découplage entre le code fluide utilisé et SYRTHES devrait faciliter la prise en main des nouvelles potentialités offertes par ce couplage.
Pour les utilisateurs novices désirant s'initier à la possibilité de réaliser des simulations thermiques couplées, cette décorrélation leur permet de fractionner leur investissement. C'est à dire, qu'il n'est nullement besoin d'avoir intégré tous les aspects fluides pour se former à l'utilisation du module SYRTHES, et en contre partie l'apprentissage du fluide peut se faire de façon indépendante du solide. La même séparation peut se concevoir dans l'appréhension de cas complexes, le découplage permettant alors de répartir les responsabilités du calcul lié à la partie fluide et à la partie solide sur deux équipes ou personnes.

Bien que permettant déjà l'appréhension de problèmes complexes, les fonctionnalités de SYRTHES sont amenées à évoluer en fonction des besoins des utilisateurs. Dans cette optique, les utilisateurs pourront renvoyer la feuille jointe en fin de ce document. L'objectif de cette feuille est double. Elle est destinée d'une part à recenser les problèmes inhérents à tout nouveau produit informatique, mais aussi à mettre en valeur les changements ou améliorations souhaités.

Grandeurs physiques et unités A

Grandeur	Unité	Signification
T	$^{\circ}C$	Température
ρ	kg/m^3	Masse volumique
C_p	$J/kg\,K$	Chaleur spécifique
k	W/mK	Conductivité thermique
ϕ	W/m^2	Flux surfacique
Φ	W/m^3	Flux volumique
h	W/m^2K	Coefficient d'échange
g	W/m^2K	Résistance de contact
α_i	*degré*	Angles
ω	rad/s	Vitesse de rotation
$\vec{q}$	W/m^2	Vecteur flux
ρ_i		Réflectivité
ε_i		Emissivité
F_{ij}		Facteur de forme
S_i	m^2	Surface (rayonnement)

Formats des fichiers SYRTHES B

Ce chapitre propose une description détaillée des formats des fichiers issus de SYRTHES. Bien que des utilitaires aient déjà été écrits pour la transformation du format retenu pour les résultats issus de SYRTHES, en un format accepté par divers post-processeurs, l'utilisateur pourra être amené à relire tout ou partie de ces fichiers pour les adapter à un post-traitement particulier ou à des formats de post-processeurs maison par exemple.

Dans la suite du chapitre, nous serons amenés à décrire les chaînes de caractères qui sont utilisées dans les fichiers : les espaces seront alors figurés par des points (·) pour qu'il soit aisé de les reconnaître et de les compter.

Hormis les fichiers historiques qui possèdent un format particulier, tous les résultats issus de SYRTHES se présentent sous une forme similaire. Ils sont toujours composés de deux fichiers : le premier contient la géométrie du domaine et le second les résultats aux noeuds du maillage.

B.1 Description de la géométrie

Les fichiers *géométrie_solide*, *géométrie_peau_fluide* et *géométrie_rayonnement* sont des bases de données contenant respectivement la description des maillages du domaine solide, de la peau du fluide en contact avec ce dernier et des parois radiatives. Ils sont au format des fichiers SYRTHES. Ils contiennent successivement une liste de nœuds (avec leurs coordonnées et leurs références), une liste d'éléments (avec les nœuds qui les composent) et éventuellement une liste de références des faces.
Le fichier géométrique contient tout d'abord un en-tête :
- lignes 1 à 3 : commentaires
- ligne 4 : C··DIMENSION·=·I1··DIMENSION DES ELTS·=·I1
- ligne 5 : C··NOMBRE DE NOEUDS·=·I10
- ligne 6 : C··NOMBRE D'ELEMENTS·=·I10
- ligne 7 : C··NOMBRE DE NOEUDS PAR ELEMENT·=·I10
- ligne 8 : commentaire

Les différentes rubriques qui suivent peuvent a priori apparaître dans un ordre quelconque dans le fichier. Généralement on trouve d'abord les coordonnées des nœuds, puis la connectivité du maillage. Enfin, on trouvera dans certains cas (cette rubrique est facultative) les références des faces.
Chaque rubrique est repérée par un en-tête.

Les coordonnées des nœuds :
- ligne 1 : C
- ligne 2 : C$·RUBRIQUE·=·NOEUDS
- ligne 3 : C
- ligne 4 à 3+nombre_de_nœuds :

C1, NUM, NUMREF,X,Y,Z

- ▷ C1 : caractère qui vaut "-" si c'est un nœud milieu, " " sinon.
- ▷ NUM : numéro du nœud
- ▷ NUMREF : numéro de référence du nœud
- ▷ X Y Z : coordonnées du nœud. On remarquera qu'il y a toujours 3 coordonnées (en dimension 2 la troisième coordonnée est inusité ; elle vaut zéro)

le format correspondant est : (A1,I6,I3,1X,3E14.7)

La table de connectivité :
- ligne 1 : C
- ligne 2 : C$·RUBRIQUE·=·ELEMENTS
- ligne 3 : C
- ligne 4 à 3+nombre_d'éléments :

NUM, NUMREF, LISTE_DES_NOEUDS

- ▷ NUM : numéro de l'élément
- ▷ NUMREF : numéro de référence de l'élément
- ▷ LISTE_DES_NOEUDS : liste des nœuds qui constituent l'élément

le format correspondant est (I7,I3,nI7) n étant le nombre de nœuds des éléments.

Dans ce fichier de résultats, la convention pour la numérotation locale des nœuds est la suivante :

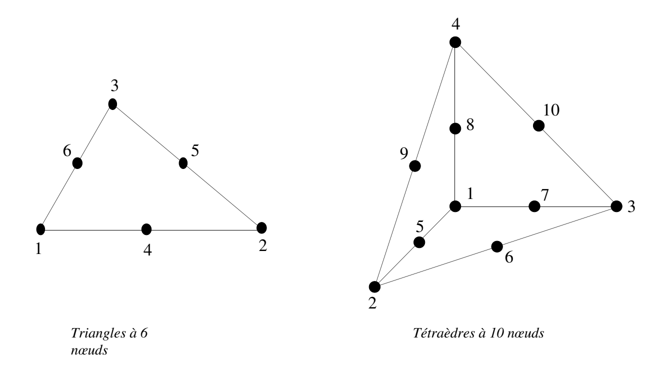


FIG. B.1 – Numérotation locale des éléments dans le fichier résultat

La table des références des faces :

- ligne 1 : C
- ligne 2 : C$ RUBRIQUE·=·REFERENCES DES FACES
- ligne 3 : C
- ligne 4 à 3+nombre_d'éléments :

NUM, LISTE_DES_REFERENCES

où

▷ NUM : numéro de l'élément

▷ LISTE_DES_REFERENCES : références des n faces qui constituent l'élément

le format correspondant est : (I6,1X,4I5)

On rappelle ici qu'en dimension 2 les références des "faces" correspondent en réalité aux références des 3 arêtes du triangles :

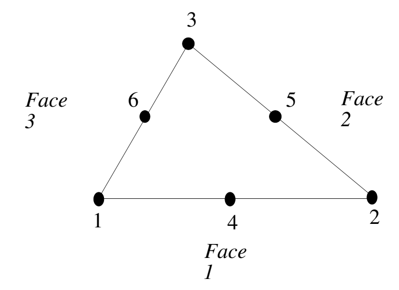


Fig. B.2 – Numérotation des "faces" du triangle

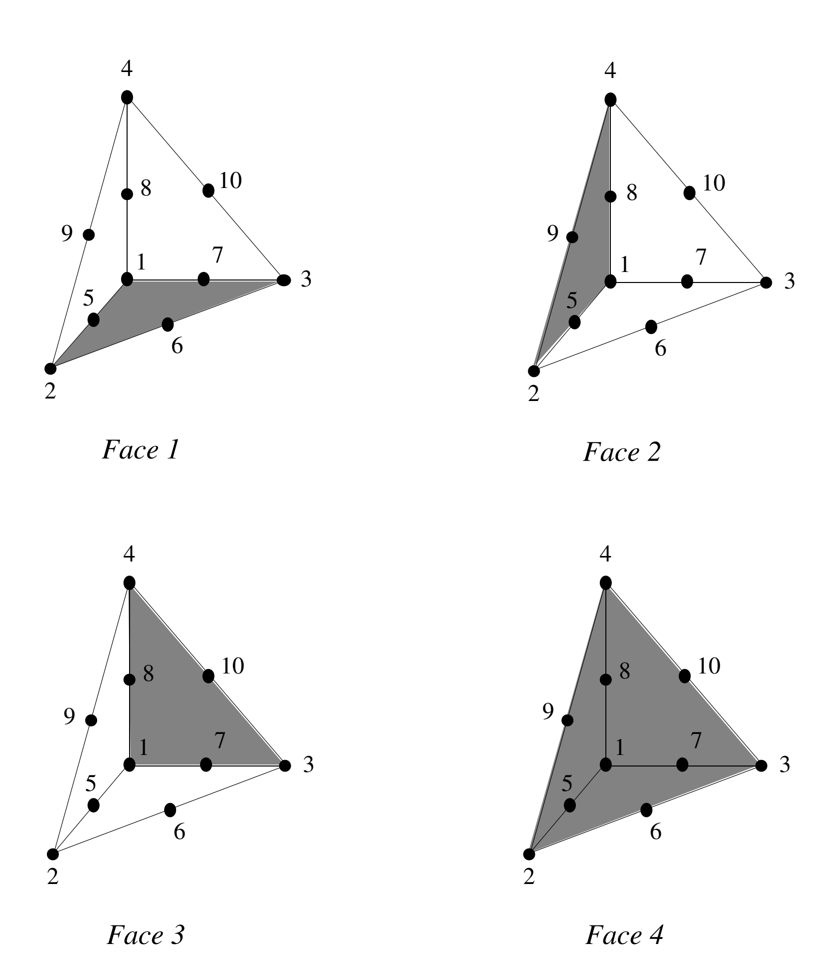


FIG. B.3 – Numérotation des faces du tétraèdre

On présente ci-dessous un fragment type du fichier résultat géométrique :

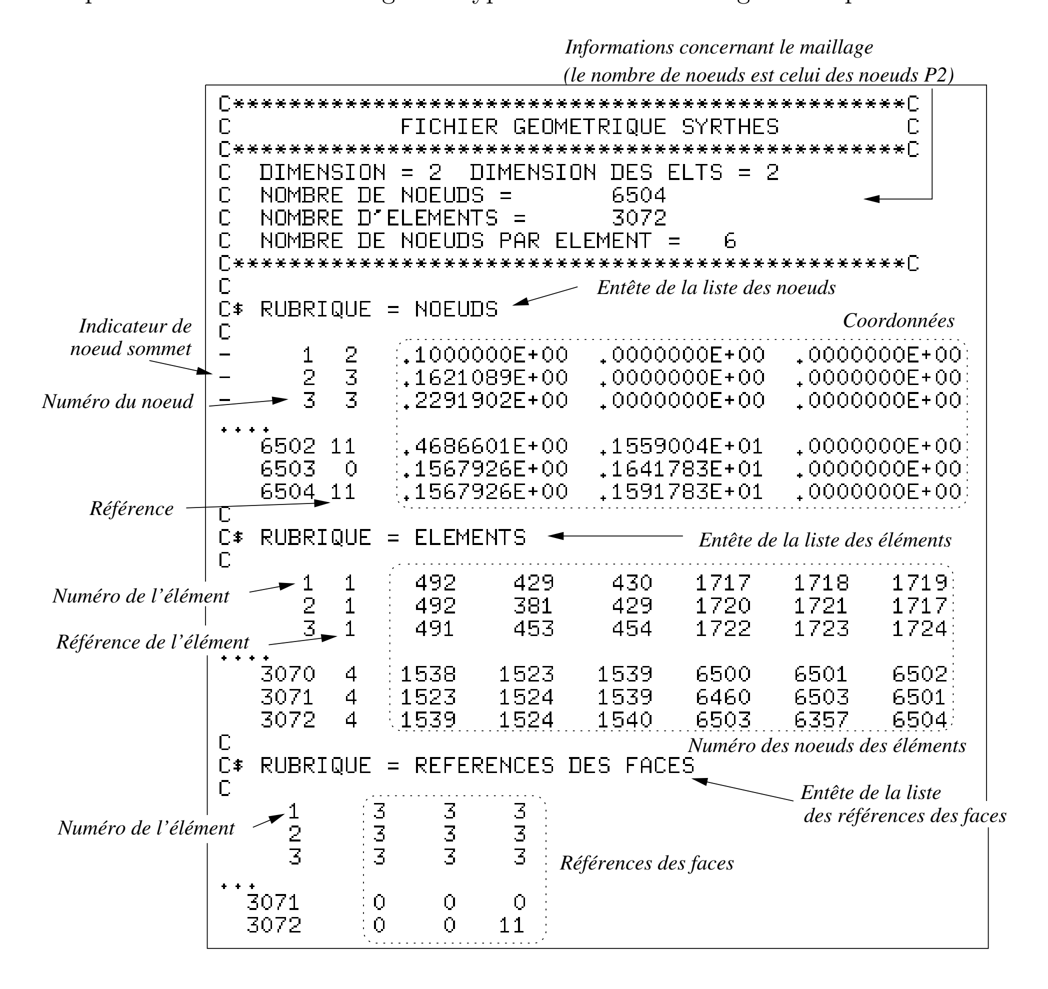


FIG. B.4 – Structure du fichier résultat géométrique

B.2 Champs de résultats

Le module SYRTHES génère divers fichiers de résultats.
Les résultats finaux sont constitués de la température aux nœuds du maillage. Ils sont fournis dans le fichier de résultats. L'utilisateur peut également demander la sauvegarde de résultats intermédiaires dans un second fichier dit "chronologique".

Dans le cas des couplages avec un code de thermohydraulique, des grandeurs complémentaires sur la peau du domaine fluide en contact avec le solide sont également disponibles. On a alors accès à deux fichiers supplémentaires de résultats (des résultats au dernier pas de temps et des résultats intermédiaires). Ces fichiers ont une structure identique à celle des fichiers de résultats sur le solide. Les résultats sont constitués de la température fluide en proche paroi et du coefficient d'échange fluide.

Dans le cas des calculs avec rayonnement, on a également accès à des résultats spécifiques directement sur le maillage de rayonnement (température, flux radiatif), mais dans ce cas, il s'agit de grandeurs constantes par élément. On dispose alors de un ou deux fichiers supplémentaires (résultats et chronologiques).

Les fichiers "résultat" et "chronologique" ont une structure identique si ce n'est que le second contient les résultats en plusieurs pas de temps.

Enfin on rappelle que des interfaces existent avec divers post-processeurs pour permettre la visualisation des résultats dans le solide comme sur la peau du fluide (cf paragraphe 4.2.2).

Description du fichier des résultats

Les fichiers de résultats ordinaires et chronologiques ont exactement la même structure. On peut ainsi dire qu'un fichier chronologique est une concaténation de n fichiers résultats à des instants différents.

Chaque pas de temps est composé d'une entête puis des tableaux des valeurs de chaque variable en tous les nœuds ou éléments du domaine.

Entête du pas de temps :

- ligne 1 : commentaire
- ligne 2 : titre du calcul (A72)
- ligne 3 : commentaire
- ligne 4 : commentaire (4 caractères puis liste des variables qui apparaissent sur la ligne suivante)
- ligne 5 : CH, NDIM, NDIELE, NELEM, NBPN1, NBPN2, NBSCAL
  - ▷ CH : chaîne de 4 caractères : C2C*
  - ▷ NDIM : dimension du problème (2 ou 3)
  - ▷ NDIELE : dimension des éléments (2=triangles, 3=tétraèdres)
  - ▷ NBELEM : nombre d'éléments
  - ▷ NBPN1 : nombre de nœuds P_1
  - ▷ NBPN2 : nombre de nœuds P_2
  - ▷ NBSCAL : nombre de scalaires résultats

Format : (A4,6I8)

- ligne 6 : commentaire (4 caractères puis liste des variables qui apparaissent sur la ligne suivante)
- ligne 7 : CH, NDPT, TEMPS, DT
  - ▷ CH : chaîne de 4 caractères : C4C*
  - ▷ NDPT : numéro du pas de temps courant
  - ▷ TEMPS : temps physique courant (seconde)
  - ▷ DT : valeur du pas de temps du calcul (seconde)

  Format : (A4,I8,2E16.6)
- ligne 8 : commentaire (4 caractères puis liste des variables qui apparaissent sur la ligne suivante)
- ligne 9 : CH, VERSION, DATE
  - ▷ CH : chaîne de 4 caractères : C6C*
  - ▷ VERSION : chaîne de 8 caractères indiquant la version du module SYRTHES utilisée pour le calcul
  - ▷ DATE : chaîne de 16 caractères

  Format : (A4,A8,A16)

Puis, pour chaque variable résultat (1 dans le cas du modèle général, 2 pour les résultats sur la peau du fluide et un nombre dépendant du nombre de bandes spectrales dans le cas du rayonnement) on trouve le groupe suivant :

- ligne 1 : NOM_VARIABLE : chaîne de 12 caractères
- ligne 2 : I1,11('-')
  L'entier indique le type de discrétisation de la variable courante
  - ▷ 1 : résultats sur les éléments du maillage
  - ▷ 3 : résultats sur les nœuds du maillage
- lignes suivantes : les résultats avec le format : 6E13.7

On présente ci-dessous un fragment type du fichier des résultats :

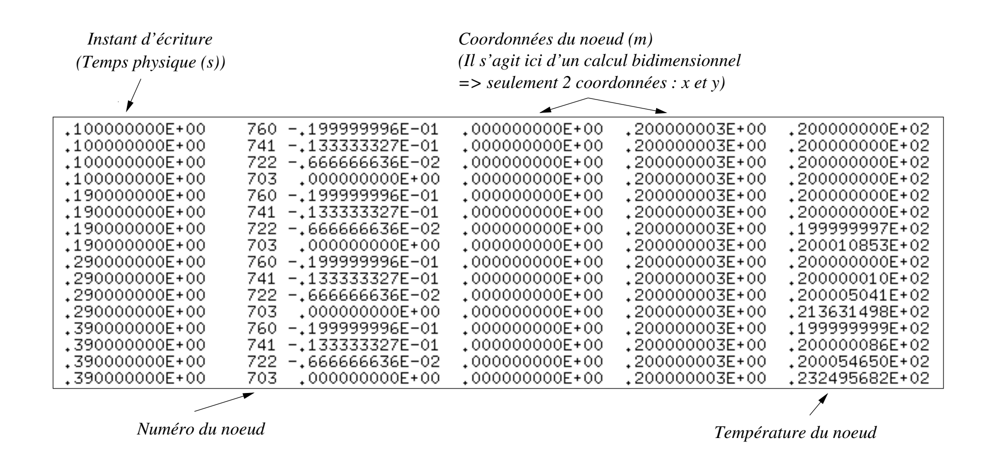

```
************************************************************************
CAS EXEMPLE
************************************************************************
C1C*    NDIM  NDIELE   NELEM   NBNP1   NBNP2  NBSCAL
C2C*       2       2   20000   10201   40401       1
C3C*    NPDT           TEMPS              DT
C4C*      10    .9000000E+03    .1000000E+03
C5C* VERSION            DATE
C6C*     3.3           TODAY
************************************************************************
TEMP SOLIDE
3-----------
 .3031246E+02 .3006461E+02 .2870519E+02 .3046245E+02 .2000000E+02 .2000000E+02
 .2000000E+02 .2000000E+02 .2000119E+02 .2001289E+02 .2007944E+02 .2002738E+02
 .2000883E+02 .2000099E+02 .2053235E+02 .2006158E+02 .2066034E+02 .2006636E+02
 .2101085E+02 .2141282E+02 .2000000E+02 .2000000E+02 .2000000E+02 .2000000E+02
 .3031246E+02 .3006461E+02 .2870519E+02 .3046245E+02 .2000000E+02 .2000000E+02
 .2000000E+02 .2000000E+02 .2000119E+02 .2001289E+02 .2007944E+02 .2002738E+02
...
```


Fig. B.5 – Structure du fichier des résultats

B.3 Historiques en temps

Les figures suivantes indiquent le format du fichier de résultats des historiques solides.

On notera que cet exemple est donné en dimension 2. Dans le cas des calculs en dimensions 3, la composition du fichier est identique si ce n'est que les 3 coordonnées des points sont présentes.



.100000000E+00	760	-.199999996E-01	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000000E+02
.100000000E+00	741	-.133333327E-01	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000000E+02
.100000000E+00	722	-.666666636E-02	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000000E+02
.100000000E+00	703	.000000000E+00	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000000E+02
.190000000E+00	760	-.199999996E-01	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000000E+02
.190000000E+00	741	-.133333327E-01	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000000E+02
.190000000E+00	722	-.666666636E-02	.000000000E+00	.200000003E+00	.199999997E+02
.190000000E+00	703	.000000000E+00	.000000000E+00	.200000003E+00	.200010853E+02
.290000000E+00	760	-.199999996E-01	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000000E+02
.290000000E+00	741	-.133333327E-01	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000010E+02
.290000000E+00	722	-.666666636E-02	.000000000E+00	.200000003E+00	.200005041E+02
.290000000E+00	703	.000000000E+00	.000000000E+00	.200000003E+00	.213631498E+02
.390000000E+00	760	-.199999996E-01	.000000000E+00	.200000003E+00	.199999999E+02
.390000000E+00	741	-.133333327E-01	.000000000E+00	.200000003E+00	.200000086E+02
.390000000E+00	722	-.666666636E-02	.000000000E+00	.200000003E+00	.200054650E+02
.390000000E+00	703	.000000000E+00	.000000000E+00	.200000003E+00	.232495682E+02

FIG. B.6 – Fichier historique issu de SYRTHES

Ce fichier, au format très simple peut être traité directement par des logiciels standards de tracé de courbes. On suggère par exemple *gnuplot* ou *xmgr*, disponibles sur station de travail et appartenant au domaine public.

Sous-programmes utilisateurs SYRTHES 3.4 C

INITMP : **Initialisation du champ de température** **[page 73]**

Par défaut, la température initiale peut être fonction de l'espace.

CPHYSO : **Propriétés physiques des matériaux** **[page 73]**

Il est ici possible de définir finement les lois de variation de :

- la masse volumique,
- la chaleur spécifique,
- la conductivité (qu'elle soit isotrope, orthotrope ou anisotrope).

Par défaut, ces propriétés sont fonction de l'espace, du temps et de la température locale. Elles sont fournies par nœuds, par éléments ou par nœud par élément.

LIMSOL : **Conditions aux limites sur les noeuds** **[page 76]**

Les conditions aux limites peuvent être de plusieurs types :

- Dirichlet,
- flux,
- coefficient d'échange,
- résistance de contact.

Par défaut, ces propriétés sont fonction de l'espace, du temps et de la température locale. Ce sous-programme est à utiliser dans le cas où l'on a choisi d'imposer les conditions aux limites sur les noeuds des éléments.

LIMFSO : **Conditions aux limites sur les faces** **[page 80]**

Ce sous-programme est l'homologue de LIMSOL dans le cas où l'on a choisi d'imposer les conditions aux limites sur les faces des éléments.

CFLUVS : **Flux volumiques** **[page 81]**

Par défaut, les flux volumiques peuvent être fonction de l'espace, du temps et de la température locale.

LIMRAY : **Conditions pour le rayonnement** **[page 83]**

Définition des bandes spectrales, de l'émissivité, et des conditions aux limites sur les facettes de rayonnement.

INREFA : **Références sur les faces des éléments** **[page 82]**

Certains mailleurs ne possèdent pas la faculté de doter les faces de références. Dans le cas où l'utilisateur souhaite malgré tout imposer ses conditions aux limites sur les faces des éléments et non sur les noeuds, le sous-programme INREFA lui permet de construire la table des références des faces à partir des références des noeuds. Il est à noter qu'en dimension 3 ce travail peut s'avérer très fastidieux : mieux vaut alors se contenter de conditions aux limites sur les noeuds ou s'en remettre à un mailleur disposant de la notion de référence de face.

Mots-clés SYRTHES 3.4 D

Ce paragraphe fournit le format des mots-clés reconnus par SYRTHES 3.4.

Dans le tableau suivant, on emploie les conventions suivantes :
- la colonne 'S' représente l'utilisation du mot-clé dans le cadre des calculs SYRTHES,
- la colonne 'S/F' représente l'utilisation du mot-clé dans le cadre des calculs couplés SYRTHES/code fluide,
- la colonne 'Défaut' indique la valeur par défaut du mot-clé,
- O : indique qu'il est obligatoire de fournir une valeur au mot-clé,
- $\nexists$: indique que le mot-clé n'existe pas,
- $\longrightarrow$ indique que la valeur du mot-clé est issue directement de la valeur de son homologue dans le code fluide,
- — : indique que le mot-clé est optionnel et possède une valeur par défaut.

D.1 Partie conductive : syrthes.data

D.1.1 Paramètres du calcul

Mot-clé	S	S/F	Défaut
'AXE D AXISYMETRIE (AUCUN,OX,OY)='	—	→	aucun
'DIMENSION DU PROBLEME='	O	→	...
'CONDITIONS LIMITES PAR NOEUD OU FACE='	—	—	noeud
'DEFINITION DES FLUX VOLUMIQUES PAR='	—	—	element
'DEFINITION DES PROPRIETES PHYSIQUES PAR='	—	—	element
'ECRITURE MAILLAGE PEAU FLUIDE='	∄	—	non
'ECRITURE MAILLAGE SOLIDE='	—	—	oui
'ECRITURE CHRONO PEAU FLUIDE='	∄	—	non
'ECRITURE RESULTATS PEAU FLUIDE='	∄	—	non
'HISTORIQUES CONDUCTION='	—	—	non
'ISOTROPIE DU MATERIAU='	—	—	1
'LECTURE DES CORRESPONDANTS SUR FICHIER='	∄	—	non
'NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE SOLIDE='	—	—	2
'NOMBRE DE DIRECTIONS PERIODIQUES='	—	—	0
'NOMBRE DE PAS DE TEMPS SOLIDES='	O	→	...
'NOMBRE D ITERATIONS SOLVEUR SOLIDE='	—	—	50
'PAS DES SORTIES CHRONO SOLIDE='	—	—	-1
'PAS DE TEMPS AUTOMATIQUE='	—,—	—,—	-1,1000
'PAS DE TEMPS MULTIPLES='	—,—	—,—	aucun
'PAS DE TEMPS SOLIDE='	O	O	aucun
'PRECISION POUR SOLVEUR SOLIDE='	—	—	10^{-6}
'PRISE EN COMPTE DU RAYONNEMENT CONFINE='	—	—	non
'SUITE DE CALCUL='	—	—	...
'STOCKAGE DES CORRESPONDANTS SUR FICHIER='	∄	—	non
'TITRE POUR LE CALCUL SOLIDE='	O	O	...

D.1.2 Définition des références

'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES COUPLE(E)S'
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES AVEC DIRICHLET'
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC FLUX'
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC COEFFICIENT D ECHANGE'
'REFERENCES NOEUDS OU ELEMENTS SOLIDES AVEC FLUX VOLUMIQUES'
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC RESISTANCE DE CONTACT'
'REFERENCES NOEUDS SOLIDES PERIODIQUES'
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC RAYONNEMENT INFINI'

D.1.3 Conditions physiques

/ ————————————————
/ Entree des conditions initiales
/ ————————————————
/ 'CINI' T(°C) références
/
/
/ ————————————————————————————
/ Entree des conditions aux limites constantes par bloc
/ ————————————————————————————
/'CLIM' 'FLUX' flux(W/m^2) références
/'CLIM' 'DIRICHLET' T(°C) références
/'CLIM' 'COEF ECH' Text(°C) h($W/m^2/K$) références
/'CLIM' 'RES CONTACT' g($W/m^2/K$) références
/'CLIM' 'PERIODICITE' 'T' $v_x v_y v_z$ références1 -1 références2
/'CLIM' 'PERIODICITE' 'R' $v_x v_y v_z$ a1 a2 a3 b1 b2 b3
références1 -1 références2
/'CLIM' 'RAYT INFINI' Text(°C) émissivité références
/
/'CVOL' $\Phi(W/m^3)$ références
/
/ ———————————————————————————-
/ Entree des conditions physiques constantes par bloc
/ ———————————————————————————-
'CPHY' 'RHO' $\rho(kg/m^3)$ références
'CPHY' 'CP' $C_p(J/kg/K)$ références
'CPHY' 'K ISOTROPE' k($W/m^2/K$) références
/
/ 'CPHY' 'K ORTHOTROPE' $k_{11}\, k_{22}\, k_{33}$ références
/ 'CPHY' 'K ANISOTROPE' $k_{11}\, k_{22}\, k_{33}$ α_1 α_2 α_3 références
/
/
/ ————
/ Historiques
/ ————
/'HIST' 'FREQ' t
/'HIST' 'NOEUDS' $n_1\, n_2\, n_3\, \ldots$
/
/
/ —————-
/ bilan de flux
/ —————-
/'BILAN FLUX SURFACIQUES' références
/'BILAN FLUX VOLUMIQUES' références

D.2 Partie radiative : syrthes.ray

D.2.1 paramètres du calcul

Mot-clé	Défaut
'DOMAINE DE RAYONNEMENT CONFINE OUVERT SUR L EXTERIEUR='	non
'HISTORIQUES RAYONNEMENT='	non
'PERIODICITE DE ROTATION POUR LE RAYONNEMENT='	non
'NIVEAU DES IMPRESSIONS POUR LE RAYONNEMENT='	2
'NOMBRE DE BANDES SPECTRALES POUR LE RAYONNEMENT='	1
'NOMBRE DE PLANS DE SYMETRIE POUR LE RAYONNEMENT='	0
'NOMBRE DE REDECOUPAGES POUR CALCUL DES FACTEURS DE FORME='	0
'PAS DES SORTIES CHRONO RAYONNEMENT='	-1
'STOCKAGE DES CORRESPONDANTS POUR RAYONNEMENT='	non
'STOCKAGE DES FACTEURS DE FORME SUR FICHIER='	non
'LECTURE DES CORRESPONDANTS POUR RAYONNEMENT='	non
'LECTURE DES FACTEURS DE FORME SUR FICHIER='	non

D.2.2 Définition des références

/ References sur le solide
/ ———————
'REFERENCES NOEUDS OU FACES SOLIDES AVEC RAYONNEMENT CONFINE'
/
/ References sur le maillage de rayonnement
/ ——————————
'RAYONNEMENT : REFERENCES FACES COUPLEES AU SOLIDE'
'RAYONNEMENT : REFERENCES FACES TEMPERATURE IMPOSEE'
'RAYONNEMENT : REFERENCES FACES FLUX IMPOSE'

D.2.3 Conditions physiques

/ ————————————————
/ Entree des conditions pour le rayonnement
/ ————————————————
/'RAYT' 'SYM3D' ax + by + cz + d = 0
/'RAYT' 'SYM3D' 0. 0. 1. -0.5
/
/'RAYT' 'SYM2D' ax + by + c = 0
/'RAYT' 'SYM2D' 0. 1. -0.5
/
/ 'RAYT' 'VOLUME CONNEXE' P_x P_y P_z
/
/'RAYT' 'PERIO3D' $P_x P_y P_z$ $A_x A_y A_z$ α
/
/'RAYT' 'PERIO2D' $P_x P_y$ α
/
'RAYT' 'BANDES SPECTRALES ' $\lambda_1 \lambda_2$

/ bande emissi ref
'RAYT' 'EMISSIVITE PAR BANDE' num_bande émissivité références
/

/'RAYT ' 'EMISSIVITE INFINI' num_bande émissivité références
/
/'RAYT' 'TEMPERATURE INFINI Température($^{\circ}C$)
/
/
/ ——————————————————————-
/ Conditions aux limites pour le rayonnement
/ ——————————————————————-
/'RAYT' 'TEMPERATURE IMPOSEE' température ($^{\circ}C$) références
/
/'RAYT' 'FLUX IMPOSE PAR BANDE' bande flux(W/m^2) références
/
/ ———
/ Historiques
/ ———
/'HISTORIQUES' f_1 f_2 f_3 ...

Fiche SYRTHES E

Bien qu'un soin particulier ait été apporté à la validation du code, si l'utilisateur est un jour confronté à un problème, il sera alors impératif de remplir une copie de la fiche d'incidents ci-jointe. Seul cet effort conduira à une réponse et, dans la mesure du possible, à une proposition de solution. Chaque fiche parvenant au support technique du produit sera analysée et un bilan de cet examen sera transmis à son rédacteur rapidement.

Mais cette fiche est également destinée à faire part à l'équipe de développement des souhaits des utilisateurs en matière d'amélioration des fonctionnalités existantes.
Cette fiche doit constituer un moyen privilégié pour les utilisateurs de formuler des demandes d'extension des potentialités de SYRTHES.

Fiche SYRTHES

Nom :
Téléphone :
Date :
Société
e−mail :
Adresse :
Machine :

Version de SYRTHES

Activation du rayonnement confiné

	OUI
	NON

Type d'utilisation

	SYRTHES
	SYRTHES / CODE_SATURNE

Type d'erreur

	AMELIORATION
	ERREUR BLOQUANTE
	ERREUR NON BLOQUANTE

Localisation du problème

	CONDUCTION
	RAYONNEMENT

Caractéristiques générales du calcul conduction

Dimension

	2D
	2D axi
	3D

Conditions aux limites

	DIRICHLET
	FLUX
	ECHANGE
	RAYT INFINI

Conductivité

	ISOTROPE
	ORTHOTROPE
	ANISOTROPE

Flux volumiques

	OUI
	NON

Periodicité

	AUCUNE
	TRANSLATION
	ROTATION

Suite de calcul

	OUI
	NON

Liste des sous−programmes utilisateurs utilisés :

Caractéristiques du calcul rayonnement

Conditions aux limites

	COUPLE AU SOLIDE
	TEMPERATURE IMPOSEE
	FLUX IMPOSE

Présence de

	SYMETRIE
	PERIODICITE

Nbre de bandes spectrales

	UNE SEULE
	PLUSIEURS

Description du problème ou de l'amélioration souhaitée

A retourner à EDF−R&D/MTI/MFTT/I83 (6, quai Watier – 78 401 CHATOU)

Bibliographie

[1] Péniguel C. - *Delft.* Heat Transfer Simulation for Industrial Applications : Needs, Limitations, Expectations 2nd Int Conf on Turbulence Heat and Mass Transfer - Delft.

[2] Sakiz M. *Guide pratique d'utilisation de Code_Saturne Version 1.0.* Rapport EDF HI-83/01/015/A.

[3] *Manuel théorique de Code_Saturne Version 1.0.* En cours de rédaction.

[4] Péniguel C, Rupp I. *Couplage Thermique Fluide-Solide - Version 1.0 - Résolution des équations de la chaleur au sein d'un solide en éléments finis (Théorie - Méthodes Numériques - Validation).* Rapport EDF/DER HE-41/93/015/A.

[5] Péniguel C, Rupp I. *SYRTHES - Conduction et rayonnement thermique - Manuel théorique de la version 3.3.* Rapport EDF R&D HI-83/01/039/A.

[6] Rupp I, Péniguel C. *SYRTHES - Conduction et rayonnement thermique - Manuel de validation de la version 3.3.* Rapport EDF R&D 2002.

[7] Péniguel C, Rupp I. A numerical method for thermally coupled fluid and solid problems. pages 1027–1039, U.K. Swansea, 1993. Numerical Methods in Thermal Problems.

[8] Péniguel C, Rupp I. A finite element approach to simulate general conduction problems. pages 555–562, U.K. Southampton, 1994. 3rd Int Conference Heat Transfert.

[9] Rupp I. *SYRTHES 3.1 : Manuel utilisateur pour la mise en œuvre de couplages externes SYRTHES/N3S/ESTET via CALCIUM/PVM.* Rapport EDF/DER HE-41/97/028/A.

[10] Péniguel C , Rupp I. Coupling conduction radiation and convection using PVM. St Venant Symp. Paris, 1997.

[11] Beaucourt D, Chraibi H. *Calcium V2 : guide d'utilisation.* Rapport EDF/DER HI-76/96/009/A.

[12] Geist A, Beguelin A, Dongarra J, Jiang W, Mancheck R. PVM 3 user's guide and reference manual. Oak Ridge Tennesse 37831. Oak Ridge National Laboratory.

[13] Péniguel C, Rupp I. A numerical approach for thermally coupled fluid and solid problems in complex geometries. pages 27–34, U.K. Southampton, 1994. 3rd Int Conference Heat Transfer.

[14] Rupp I , Péniguel C. Coupling heat conduction and radiation and convection phenomena in complex 2D and 3D geometries. U.K. Swansea, 1997. Numerical Methods in Thermal Problems.

[15] *MPI : A Message Passing Interface Standard.* June 12, 1995.

[16] *Documentation technique du logiciel SIMAIL.* SIMULOG.

[17] SDRC. *Logiciel Ideas MS - I-deas Finite element modeling - maillage (supertab),Aide en ligne du logiciel.*

[18] CEI. *EnSight - Users guide.* CEI - 1997.

[19] Berthou J.Y., Lefebvre V. *Guide d'utilisation de la bibliothèque d'échanges de données MED V2.0.* Rapport EDF/DER HI-76/2000/002/A.

[20] Berthou J.Y., Lefebvre V. *Guide de référence de la bibliothèque d'échanges de données MED V2.0.* Rapport EDF/DER HI-76/2000/003/A.

Index